

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ANALÝZA NADPROUDOVÉ SPOUŠTĚ POMOCÍ MKP

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

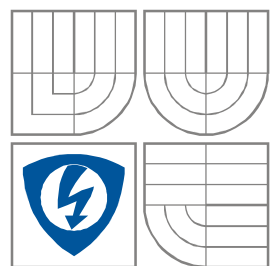
Bc. ZBYNĚK MAKKI

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologií**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ANALÝZA NADPROUDOVÉ SPOUŠTĚ POMOCÍ MKP

FEM ANALYSIS OF OVER CURRENT TRIP UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

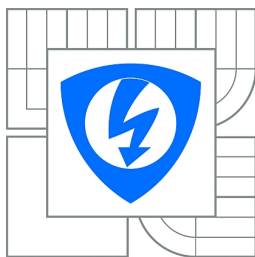
Bc. Zbyněk Makki

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Sílnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Zbyněk Makki

ID: 85243

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Analýza nadproudové spouště pomocí MKP

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište konstrukční provedení nadproudové spouště jističe.
2. Pro zadané podmínky proveďte výpočet rozložení hustoty proudu a dalších veličin.
3. Získané výsledky pečlivě vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 20.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem projektu bylo připravit zadaný model proudovodné dráhy v prostředí programu Solidworks, aby bylo možné tuto proudovodnou dráhu simulovat v prostředí programu Ansys, kde se podle zadaných podmínek provedl výpočet rozložení hustoty proudu, úbytků napětí a výpočet tepelného úbytku na zadané proudovodné dráze. Získané výsledky jsou analyzovány v závěru této práce.

Abstract

The aim of the project was to prepare the given model of the current path in the environment of the SolidWorks programme, in order to simulate the flow path in the environment of the Ansys programme, where there was calculated the distribution of current density, voltage drops and heat loss on the the specified current track according to specified conditions. The obtained results are analyzed at the conclusion of this work.

Klíčová slova

SolidWorks, Ansys, metoda konečných prvků, jistič, nadproudová spoušť, povrchový jev, vliv blízkosti, proudová hustota

Keywords

SolidWorks, Ansys, finite element method, circuit breaker, overcurrent trip unit, skin effect, proximity effect, current density

Bibliografická citace

MAKKI, Z. *Analýza nadproudové spouště pomocí MKP*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza nadproudové spouště pomocí MKP jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

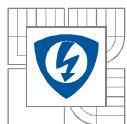
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

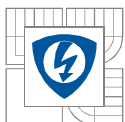
V Brně dne

Podpis autora

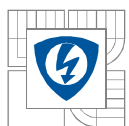


OBSAH

1 ÚVOD	13
1.1 JISTIČ	13
1.1.1 PŘÍKLAD KONSTRUKCE JISTIČE	13
1.1.2 NEVÝHODY POJISTEK	14
1.1.3 PŘEDNOST JISTIČŮ	14
1.2 KONSTRUKCE NADPROUDOVÉ SPOUŠTĚ	15
1.2.1 ELEKTROMAGNETICKÁ SPOUŠŤ	15
1.2.2 TEPELNÁ SPOUŠŤ	15
1.3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	16
2 ÚPRAVA PROUDOVODNÉ DRÁHY	17
3 POSTUP SIMULACE V PROGRAMU ANSYS V PŘÍPADĚ PRŮCHODU STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU	17
4 STEJNOSMĚRNÝ PROUD, JEDNA PROUDOVODNÁ DRÁHA	20
4.1 VÝSLEDKY	21
4.2 GRAFICKÁ UKÁZKA VÝSLEDKŮ	23
4.2.1 ROZLOŽENÍ PROUDU	24
4.2.2 TEPELNÉ ZTRÁTY	28
5 ELEKTROMAGNETIZMUS	31
5.1 POVRCHOVÝ JEV (SKIN EFEKT)	31
5.1.1 VÝPOČET HLOUBKY VNIKU PRO POUŽITÉ MATERIÁLY NAPÁJENÉ ČASOVĚ PROMĚNNÝM PROUDEM O RŮZNÝCH FREKVENCÍCH	33
5.2 VLIV BLÍZKOSTI	34
5.3 VÍŘIVÉ PROUDY	35
5.4 POSTUP SIMULACE	35
6 PRAKTICKÝ PŘÍKLAD MĚŘENÍ PŘÍDAVNÝCH ZTRÁT PŘÍMOČARÉHO PLNÉHO VODIČE KRUHOVÉHO PRŮŘEZU	37
6.1 ÚVOD	37
6.2 ROZBOR NUMERICKÉ ČÁSTI ÚLOHY	37
6.3 GRAF	37
6.4 GRAFICKÉ ROZLOŽENÍ SIMULACE	39
6.4.1 ÚBYTKY NAPĚTÍ	41
6.4.2 ROZLOŽENÍ PROUDU	42
6.4.3 TEPELNÉ ZTRÁTY	44
6.4.4 MAGNETICKÁ INDUKCE	46
6.5 SHRUTÍ	48
7 STŘÍDAVÝ PROUD , JEDNA PROUDOVODNÁ DRÁHA	50
7.1 VÝSLEDKY	51
8 STŘÍDAVÝ PROUD , TŘI PROUDOVODNÉ DRÁHY	55
8.1 VÝSLEDKY	56

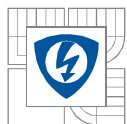


9 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	58
10 ZÁVĚR.....	58
LITERATURA	60

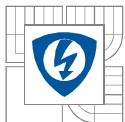


SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Příklad konstrukce jističe</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 2: Jistič - schematická značka</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 3: Konstrukční uspořádání jistícího prvku</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 4: Filtrování použitých analýz</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 5: Volba elementu SOLID69.....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 6: SOLID69.....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 7: Změna měřítka</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 8: Volba rezistivity.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 9: Detaily rozložení proudu v celé proudovodné dráze bez otvorů pro uchycení topítka seshora.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 10: Detaily rozložení proudu v celé proudovodné dráze s otvory pro uchycení topítka seshora.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 11: Detail rozložení proudu v celé proudovodné dráze bez otvorů pro uchycení topítka zespod.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 12: Detail rozložení proudu v celé proudovodné dráze s otvory pro uchycení topítka zespod.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 13: Detail tepelných ztrát v celé proudovodné dráze s otvory pro uchycení topítka seshora.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 14: Detaily tepelných ztrát v celé proudovodné dráze bez otvorů pro uchycení topítka zespod.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 15: Detail tepelných ztrát v celé proudovodné dráze s otvory pro uchycení topítka zespod.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 16: Vliv jevu blízkosti při souběžném a protiběžném průchodu proudu vodiči.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 17: Vířivé proudy masivním vodičem</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 18: Vířivé proudy v izolovaných plechách.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 19: Filtrování použitých analýz</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 20: Volba elementu SOLID97.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 21: SOLID97.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 22: Umístění simulované tyče ve vzduchovém obalu.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 23: Vytvořená síť prvků na simulované tyči</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 24: Vytvořená síť prvků na vzduchovém obalu.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 25: Úbytek stejnosměrného napětí na simulované tyči.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 26: Úbytek střídavého napětí o frekvenci 50Hz na simulované tyči.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 27: Rozložení hustoty stejnosměrného proudu v simulované tyči.....</i>	<i>42</i>

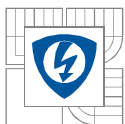


<i>Obrázek 28: Rozložení hustoty střídavého proudu o frekvenci 50Hz v simulované tyči.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 29: Detail vstupní části simulované tyče v případě rozložení hustoty stejnosměrného proudu</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 30: Detail vstupní části simulované tyče v případě rozložení hustoty střídavého proudu o frekvenci 50Hz.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 31: Rozložení tepelných ztrát při průchodu stejnosměrného proudu simulovanou tyčí..</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 32: Rozložení tepelných ztrát při průchodu střídavého proudu o frekvenci 50Hz simulovanou tyčí.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 33: Detail vstupní části simulované tyče v případě tepelných ztrát způsobených průchodem stejnosměrného proudu</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 34: Detail vstupní části simulované tyče v případě tepelných ztrát způsobených průchodem střídavého proudu o frekvenci 50Hz</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 35: Grafické rozložení magnetické indukce v podélném směru procházejícího střídavému proudu o frekvenci 50Hz</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 36: Vektorové rozložení magnetické indukce v podélném směru procházejícího střídavého proudu o frekvenci 50Hz</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 37: Grafické rozložení magnetické indukce ve směru kolmém k procházejícímu střídavému proudu o frekvenci 50Hz.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 38: Vektorové rozložení magnetické indukce ve směru kolmém k procházejícímu střídavému proudu o frekvenci 50Hz.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 39: Detail vstupní části simulované tyče v případě rozložení magnetické indukce ve směru kolmém k procházejícímu střídavému proudu o frekvenci 50Hz.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 40: Rozložení proudu ve třech proudovodných drahách.....</i>	<i>55</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Shrnutí výsledků hloubky vniku.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 2: Zvolené parametry a podmínky výpočtu</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 3: Kontrolní výpočet zvolené geometrie pro střídavý proud 50Hz</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 4: Kontrolní výpočet zvolené geometrie pro střídavý proud 400Hz</i>	<i>39</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

I [A]	Elektrický proud
P [W]	Tepelné ztráty
R [Ω]	Činný odpor
f [Hz]	Frekvence
ω [rad/s]	Úhlová frekvence
t [s]	Čas
l [m]	Délka
S [m ²]	Průřez
ρ [$\Omega \cdot m$]	Měrný odpor
σ [S/m]	Měrná vodivost
π [-]	Ludolfovo číslo
Z [Ω]	Impedance
μ_0 [H/m]	Permeabilita vakua
μ_r [H/m]	Relativní permeabilita
E [V/m]	Intenzita elektrického pole
H [A/m]	Intenzita magnetického pole
k_s [-]	Činitel výrazu
δ [m]	Hloubka vniku
J [A/m ²]	Proudová hustota
γ [m ⁻¹]	Konstanta šíření
ξ [%]	Odchylka

1 ÚVOD

Projekt vznikl na základech požadavků praxe na zhodnocení proudovodné dráhy umístěné v jističím prvku, která je navržena jako nově řešený model s nadproudovou spouští.

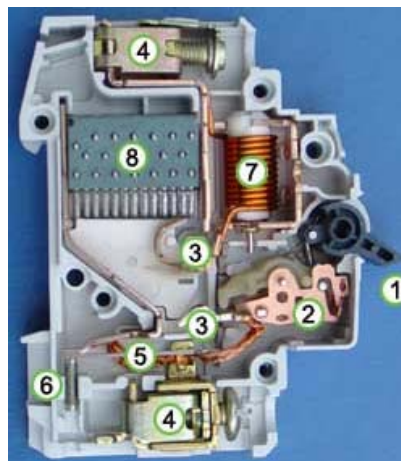
1.1 Jistič

Jistič je elektrický přístroj, který při nadměrném elektrickém proudu (tzv. nadproudu) (většinou při přetížení nebo zkratu) automaticky rozpojí elektrický obvod a tím může chránit obsluhu před možným úrazem elektrickým proudem a chráněné elektrické zařízení před jeho poškozením. Na rozdíl od pojistky, která musí být vyměněna, lze jistič znovu zapnout a obnovit tak dodávku proudu do elektrického obvodu. Jedná se tedy o nedestruktivní jističí zařízení.

Charakteristickými hodnotami jističe jsou jmenovité napětí, pro které je určen, zkratový proud, který je schopen vypnout (u běžných domácích přístrojů typicky několik kiloampérů, které jsou dány zkratovým výkonem nejbližšího transformátoru) a vypínací charakteristika (podle rychlosti reakce na nadproud nebo zkratový proud udávaná v milisekundách). Motorové jističe určené pro ochranu prakticky všech elektromotorů musí být konstruovány tak, aby vysoké záběrové proudy elektromotorů v klidovém stavu (tedy při startu motoru z klidového stavu) nevedly k jejich nežádoucímu vypnutí, což je dáno právě správnou vypínací charakteristikou jejich jističe.

1.1.1 Příklad konstrukce jističe

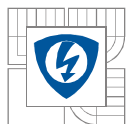
1. ovládací páčka
2. aretační mechanismus
3. kontakty
4. přívodní šroubová svorka
5. bimetalový člen pro vybavení přetížením
6. regulační prvek nastavení citlivosti
7. elektromagnetická spoušť pro vybavení zkratem
8. zhášecí komora



Obrázek 1: Příklad konstrukce jističe



Obrázek 2: Jistič - schematická značka



1.1.2 Nevýhody pojistek

- Funkce pojistky je jednorázová a z ní plyne i nejistota, zda použitá patrona má skutečně garantovanou vypínací schopnost a příslušnou charakteristiku.
- Výkonové pojistky mohou vyměňovat pouze kvalifikovaní pracovníci.
- Nejsou-li pojistky vestavěny do pojistkového vypínače nebo odpojovače, může nastat chod na dvě fáze.
- Pojistky stárnou a může docházet k jejich zapůsobení, i když nenastane poruchový stav.
- K době potřebné pro odstranění poruchy se počítá ještě doba pro výměnu pojistky
- Ve všech případech není zaručena náhrada přetavené patrony pátranou o stejných vlastnostech.
- Je nutné udržovat sklad ND.
- U exportovaných a importovaných zařízení mohou vzniknout problémy při náhradách pojistek jiných výrobců.
- Pojistky nejsou vhodné pro vypínání malých nadproduktů

1.1.3 Přednost jističů

- Možnost nedestruktivního ověřování vypínací schopnosti i vypínací charakteristiky.
- Po vypnutí, okamžitá připravenost k zapnutí.
- Správné přiřazení vypínací charakteristiky přímo při výrobě rozvaděčů nebo při montáži.
- Zajištění stejné vybavovací charakteristiky ve všech vývodech (odpadá možnost omylu při nahrazování pojist. patronou).
- Při nadproudech mohou mít jističe podstatně kratší čas než pojistky (závisí na nastavení zkratových spouští).
- Snadná revize a údržba jističů.

[2]

1.2 Konstrukce nadproudové spouště

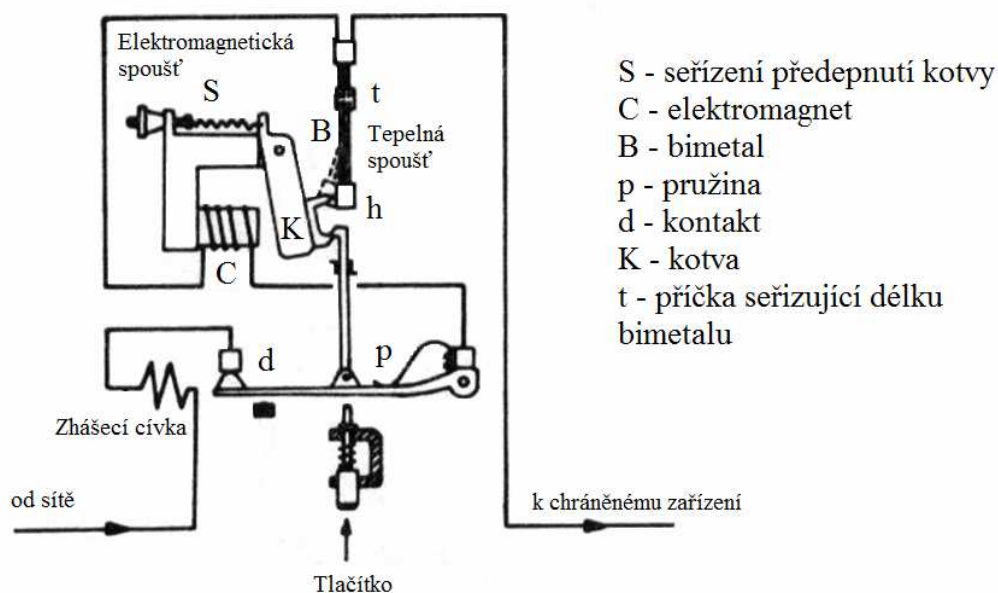
1.2.1 Elektromagnetická spoušť

Tento typ nadproudové spouště je konstruován pomocí elektromagnetu. Jeho magnetický obvod je buzen magnetickým polem proudu, který protéká proudovodnou drahou obsaženou v jisticím prvku. Při překročení limitní hodnoty proudu překoná kotva nadproudové spouště sílu vinuté pružiny, která na spoušť působí v opačném směru a je vtažena do magnetického obvodu spouště. Pohyb spouště je následně přenášený přes kolébku na záchytný mechanismus a způsobí vypnutí jisticího prvku. Vypínací doby tohoto typu spouště se pohybují řádově v jednotkách milisekund. Hodnoty nadproudů, které patří do skupiny zkratových proudů jsou nastavitelné pro různé typy jisticích prvků.

[5]

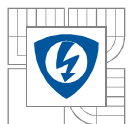
1.2.2 Teplená spoušť

Tento typ spouště působí v nepřímé časové závislosti při průchodu proudu jisticím prvkem, tj. při velkém nadproudu vypíná za krátkou dobu a při působení malých nadproudů vypíná za delší dobu. Je zpožděně časově závislá. Její princip je založen na postupném zahřívání bimetalu. Bimetal je dvojkov, kde každý z těchto kovů má jinou tepelnou roztažnost. A při rozdílné tepelné roztažnosti použitých materiálů dochází k ohybu bimetalu, který opět působí na kolébku záchytného mechanismu a dochází k vypnutí jisticího prvku. Konstrukční uspořádání jisticího prvku je znázorněné na Obr. 3.



Obrázek 3: Konstrukční uspořádání jisticího prvku

[6]



1.3 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků vzešla z potřeby řešení komplexních úloh statické mechaniky ve stavebním a leteckém inženýrství. Její vývoj může být vysledován až k práci A.Hrennikoffova (1941) a R.Couranta (1942). Ačkoliv byly přístupy použité těmito průkopníky zásadně odlišné, mají jednu společnou charakteristiku: rozsírání spojitě oblasti do množiny samostatných podoblastí. Hrennikoffova práce rozděluje oblast za pomoci mřížky, podobně Courant dělí oblast do konečného počtu trojúhelníkových podoblastí pro řešení eliptických parciálních diferenciálních rovnic druhého stupně, které byly sestaveny z úlohy zabývající se krutem válce. Courantův evoluční přístup byl použitelný rozměrná tělesa již dříve získaných řešení těchto diferenciálních rovnic odvozených Rayleighem, Ritzem a Galerkinem. Vývoj metody konečných prvků započal na začátku 50-tých let 20.století při řešení konstrukce letadla a úloh statické mechaniky. Hnacím motorem bylo v letech 60-tých středisko v Berkeley zaměřené na úlohy stavebního inženýrství. Metoda byla propracována spolu s precizním matematickým aparátem v roce 1973 v publikaci Stranga a Fixe „Analysis of The Finite Element Method“ (Analýza metody konečných prvků), kdy již byla zobecněna do samostatného oboru Aplikované matematiky pro numerické řešení fyzikálních soustav v celé řadě rozmanitých inženýrských disciplín např. elektromagnetismus, dynamika tekutin.

Rozvoj metody konečných prvků ve statické mechanice je často založen na energetickém principu např. princip virtuálních prací nebo minimum celkové potenciální energie, které poskytují obecný intuitivní fyzikální základ se zásadním dopadem na stavební inženýrství.

Z matematického hlediska je metoda konečných prvků (MKP) používána pro nalezení aproximovaného řešení parciálních diferenciálních rovnic (PDR) i integrálních rovnic např. rovnice vedení tepla. Postup řešení je založen jednak na úplné eliminaci diferenciální rovnice (stacionární úlohy), nebo na převedení PDR na ekvivalentní obyčejnou diferenciální rovnici, jež je následně řešena standardními postupy jako např. metodou konečných diferencí a další.

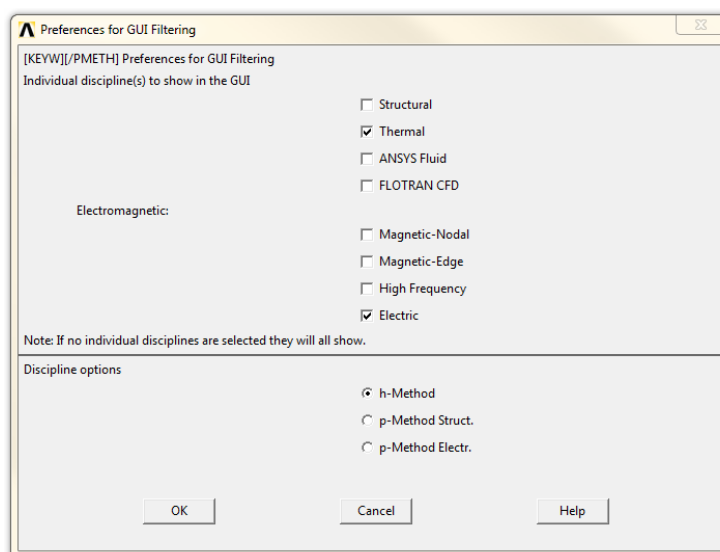
Při řešení parciálních diferenciálních rovnic je základním krokem sestavení rovnice, která aproximuje řešenou rovnici a která je numericky stabilní ve smyslu, že chyby ve vstupních datech a pomocných výpočtech se neakumulují a nevedou tak k nesmyslným výsledkům. Existuje celá řada možných postupů, všechny s určitými výhodami i nevýhodami. Metoda konečných prvků je rozumnou volbou pro řešení parciálních diferenciálních rovnic na složitých oblastech (jakými jsou např. automobily či potrubní rozvody) nebo v případě kdy požadovaná přesnost se mění po celé oblasti řešení. Například při simulaci místního počasí na Zemi je mnohem důležitější dosáhnout přesné predikce nad zemí než nad oceánem, to je požadavek, který je právě dosažitelný metodou konečných prvků.

2 ÚPRAVA PROUDOVODNÉ DRÁHY

V prvním kroku této práce bylo nutné překreslit zadanou proudovodnou dráhu v prostředí programu Solidworks a rozdělit ji na určitý počet elementů, aby bylo možné se zadaným modelem dále pracovat v prostředí programu Ansys. Proudovodná dráha byla rozdělena na 20 elementů a byly k ní přidány další dva elementy, které simulují přípojnice a v simulacích zajišťují přirozené rozdělení proudu, který prochází zadanou proudovodnou dráhou.

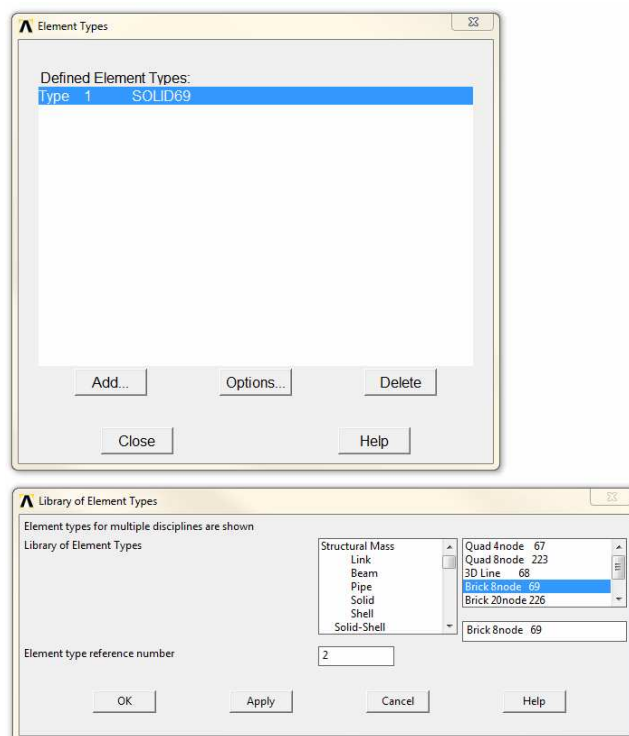
3 POSTUP SIMULACE V PROGRAMU ANSYS V PŘÍPADĚ PRŮCHODU STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU

Pro začátek simulace bylo nutné upravit zadanou geometrii, aby mohla být použita v programu Ansys. Jako výměnný formát souboru byl použit formát SAT, který převádí objemy těles. Dále je vhodné vyfiltrovat různé analýzy, výběrem pouze těch, které budou použity a potřebné pro zvolený typ analýzy Thermal a Electric jak je zobrazeno na Obr. 4.

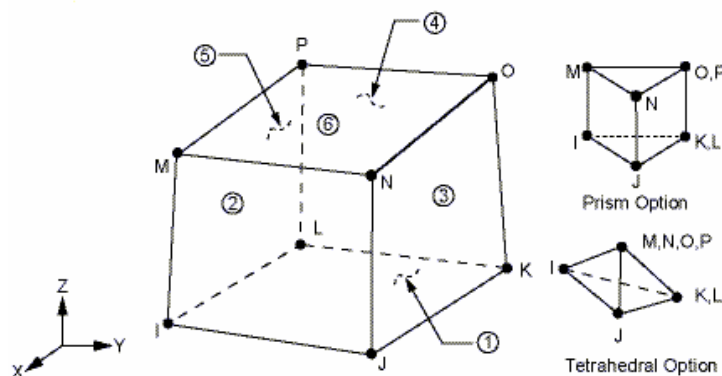


Obrázek 4: Filtrování použitých analýz

Velmi důležitá je volba použitého typu elementu. Pro simulaci byl zvolen element SOLID69 což je typ BRICK 8node 69 jak je patrné na Obr. 5 a Obr. 6. Element SOLID69 má schopnost tepelné a elektrické vodivosti. V tepelné rovnováze je také zahrnuto Jouleovo teplo vyjádřené tokem proudu. Prvek má osm uzlů s dvěma stupni volnosti, teploty a napětí v každém uzlu. Tento prvek je vhodný pro termo-elektrické trojrozměrné analýzy a proto byl zvolen pro řešení zadané úlohy.

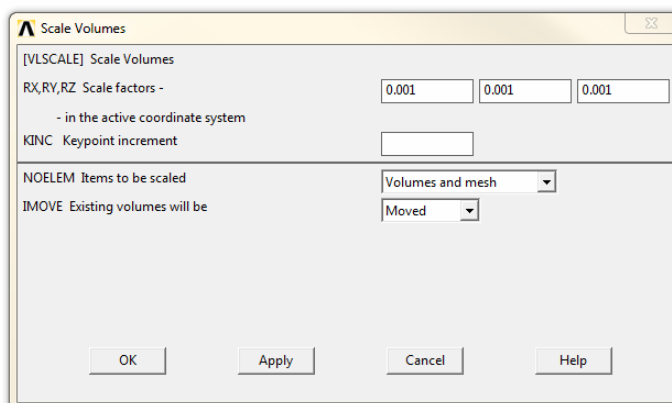


Obrázek 5: Volba elementu SOLID69



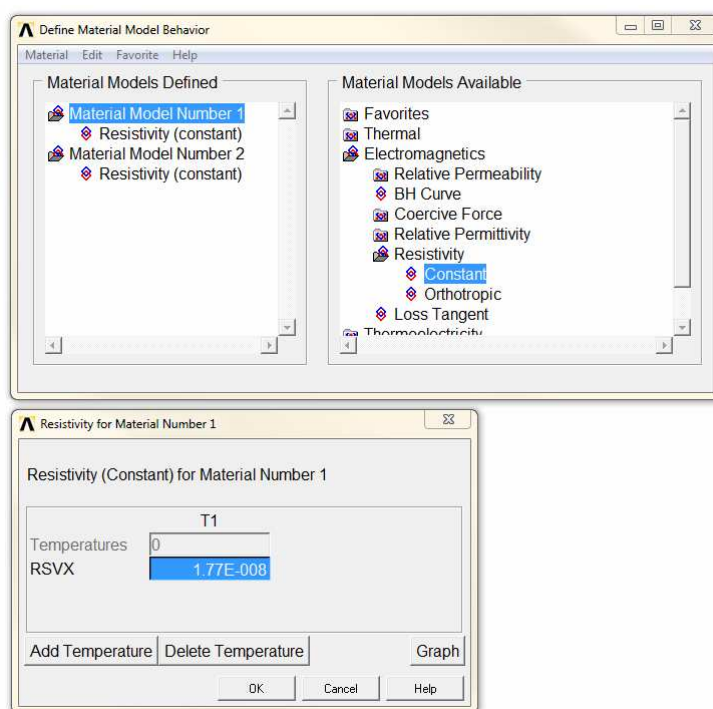
Obrázek 6: SOLID69

Dále bylo nutné nastavit teplotu na $^{\circ}\text{C}$ a upravit měřítko námi vložené geometrie, protože Ansys má základní jednotky v metrech. Změna měřítka je patrná na Obr. 7.



Obrázek 7: Změna měřítka

Další důležitou volbou je nastavení rezistivity, protože v určitých zadáních se skládal model z mosazi s přípojnici z mědi, bylo nutné zvolit dvě rezistivity, které se před tvorbou sítě prvků nastavily na potřebné části simulovaného modelu. Rezistivita byla volena podle tabulek dodaných zadavatelem projektu a to pro měď $1,77 \times 10^{-8}$ a pro mosaz 4×10^{-8} . Ukázka volby rezistivity je na Obr. 8.



Obrázek 8: Volba rezistivity

[4]

Po zadání všech potřebných podmínek je možné na zadaném modelu vytvořit síť prvků. Přípojnice, zvolené v simulaci, byly vždy z měděného materiálu o tloušťce 3mm a to i v případě pokud se prováděla simulace pro poudovodnou dráhu vyrobenou z mosazi. Na závěr je nutné zadat na jednu stranu proudovodné dráhy konstantní hodnotu potenciálu napětí 0V a na druhou, vstupní stranu, zadat požadovaný proud pro simulaci. Simulace byla volena pro zadané případy jak je vidět v diagramu 1.

4 STEJNOSMĚRNÝ PROUD, JEDNA PROUDOVODNÁ DRÁHA

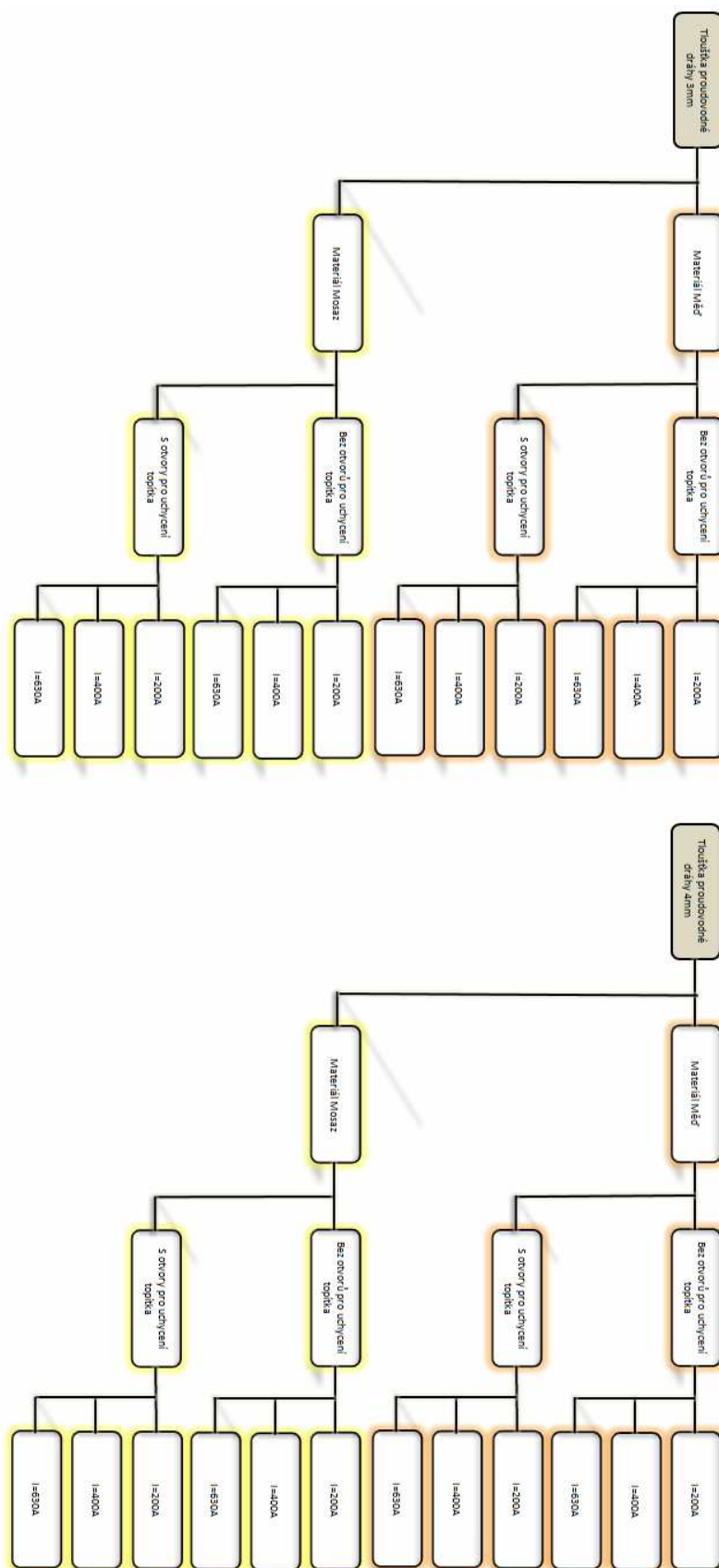
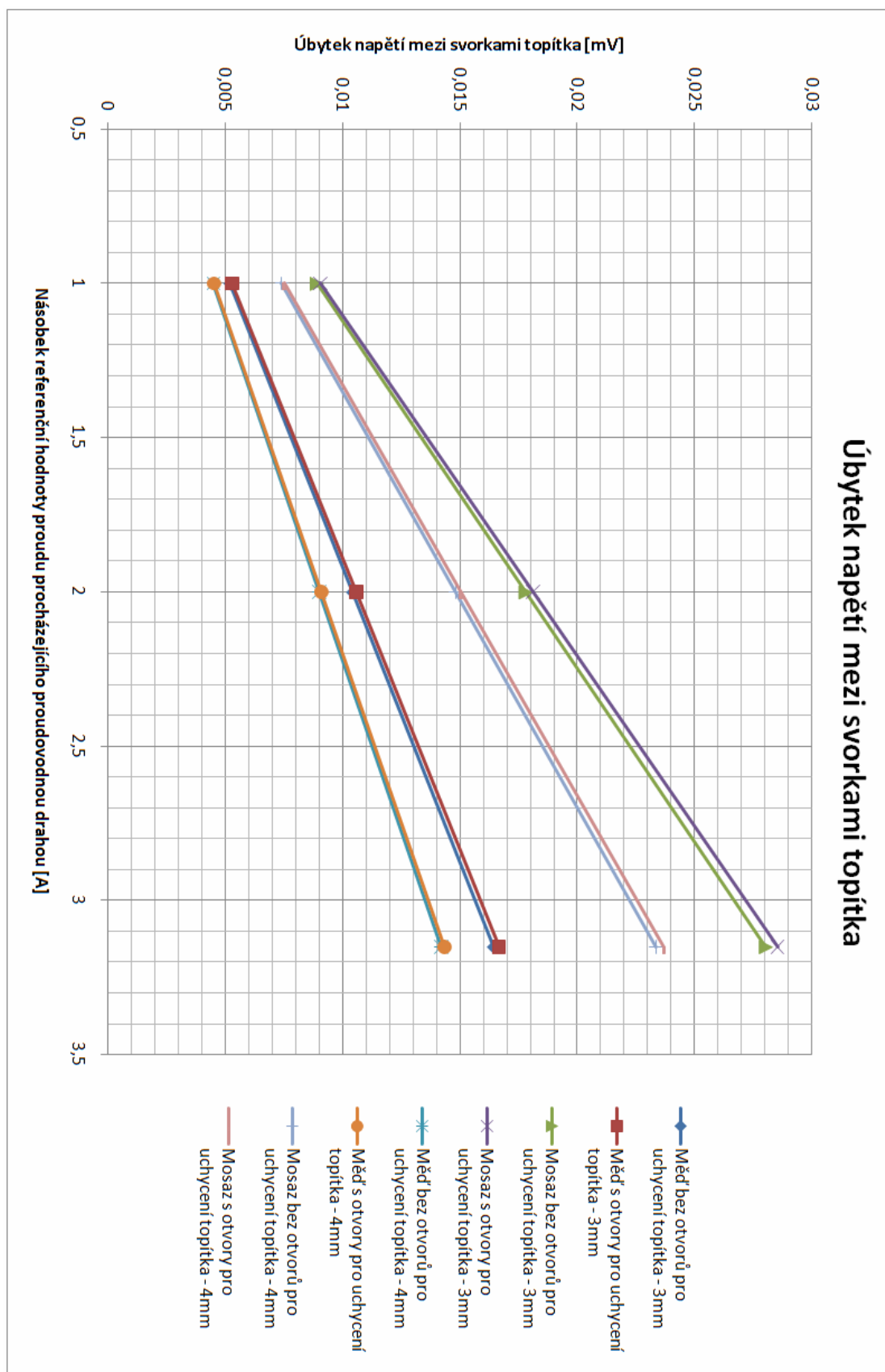
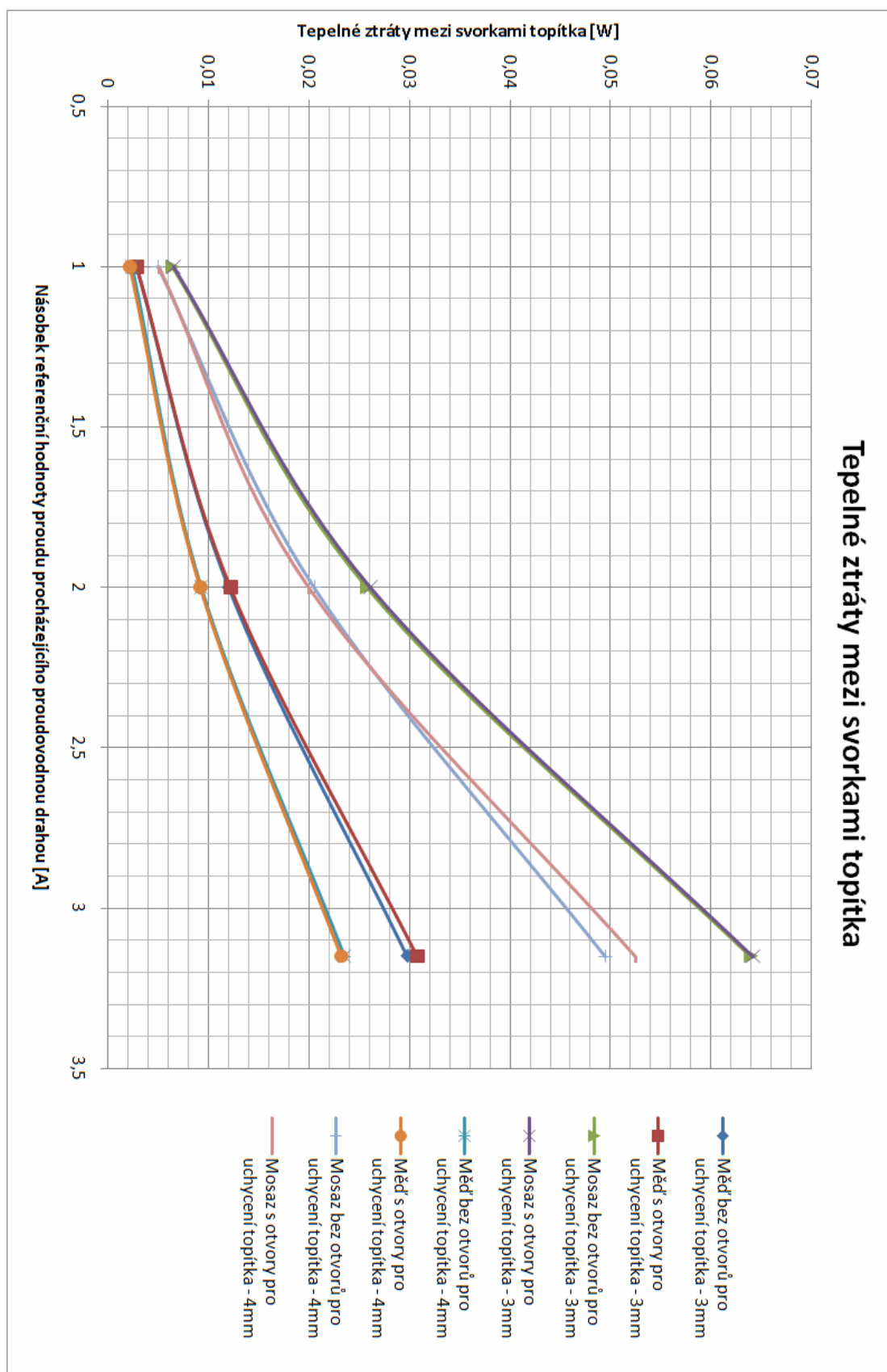


Diagram 1: Kombinace zadaných řešení při průchodu stejnosměrného proudu

4.1 Výsledky



Graf 1: Úbytky napětí mezi svorkami topítka v proudovodné dráze při průchodu stejnosměrného proudu



Graf 2: Tepelné ztráty mezi svorkami topítka v proudovodné dráze při průchodu stejnosměrného proudu

4.2 Grafická ukázka výsledků

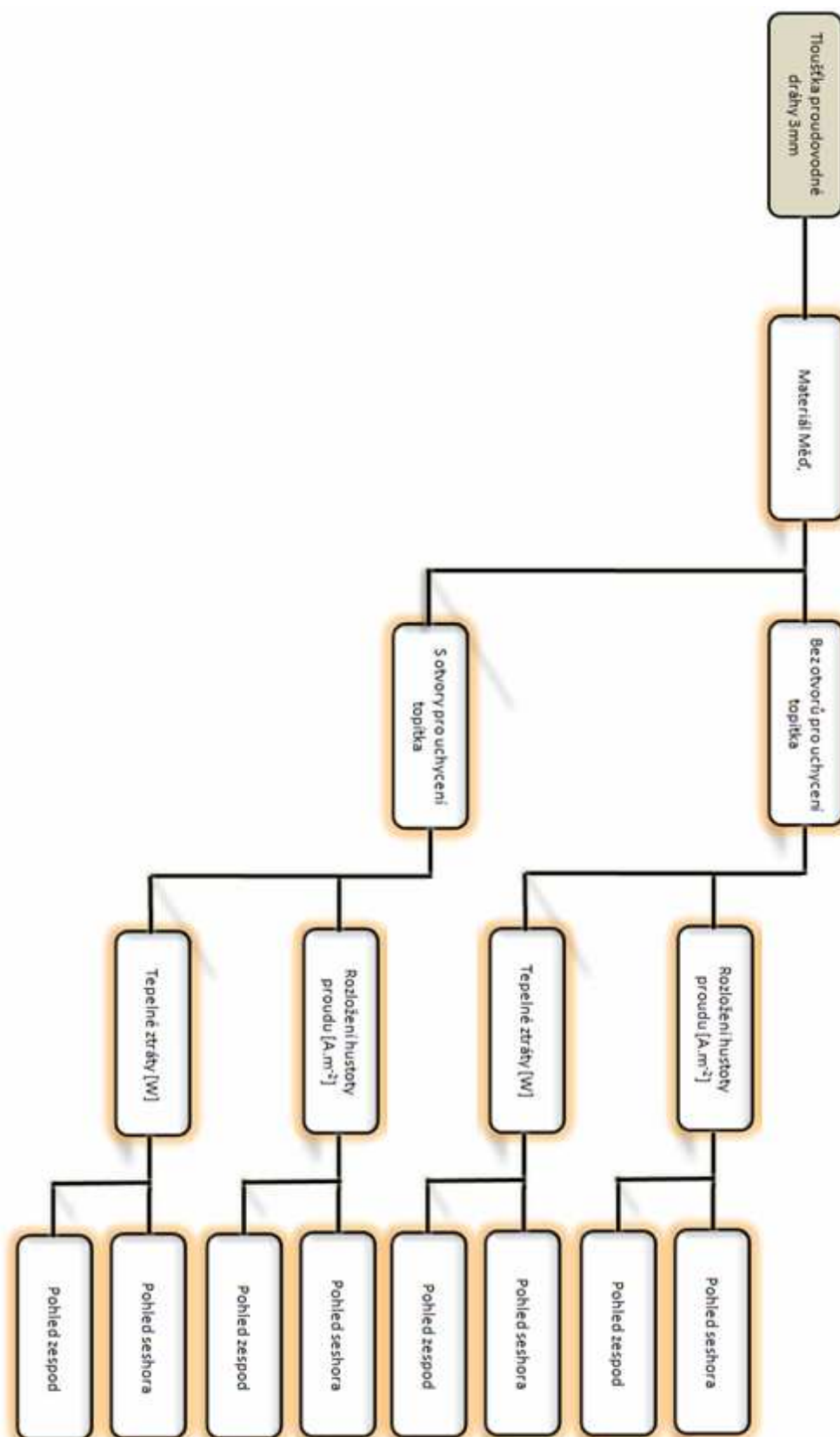
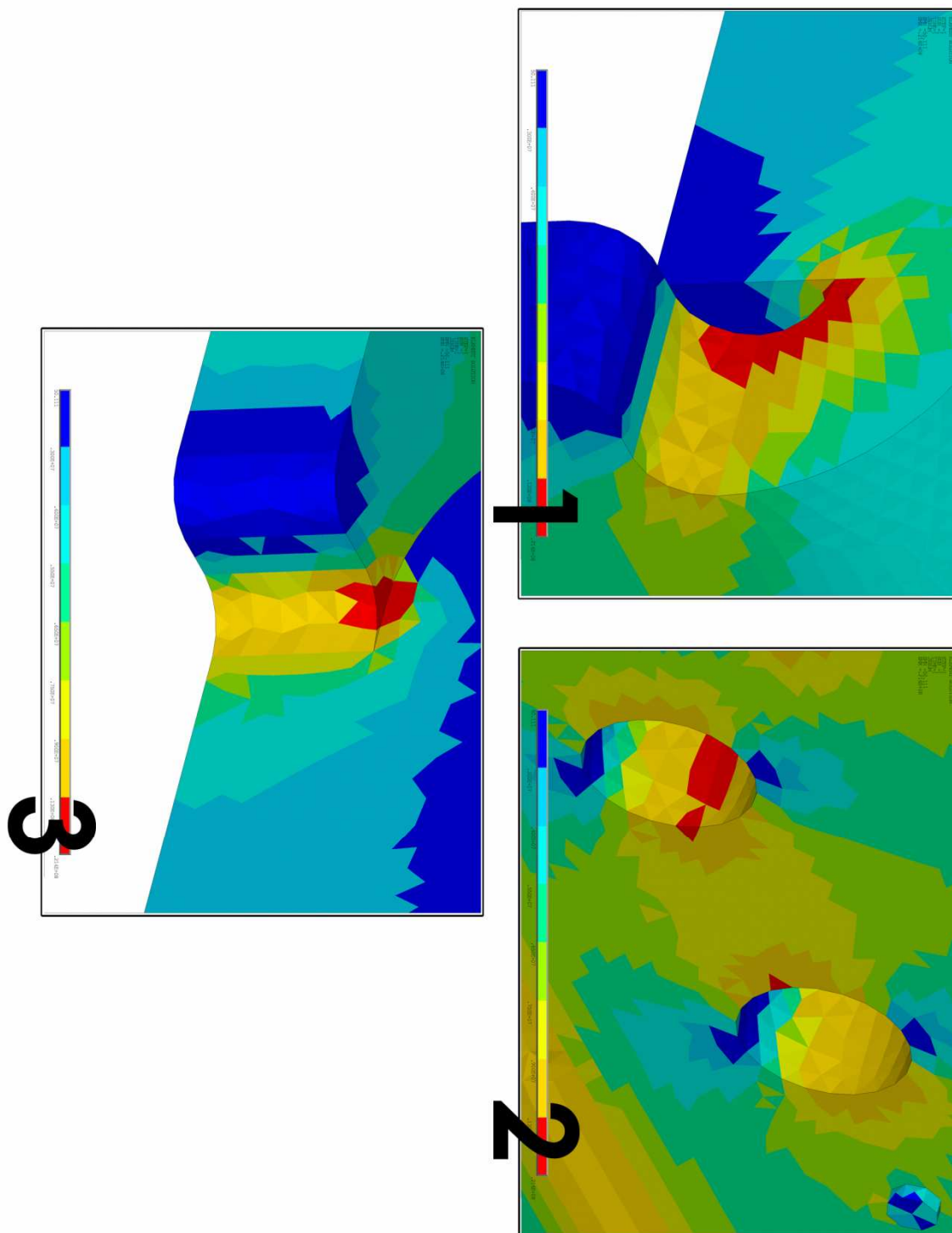
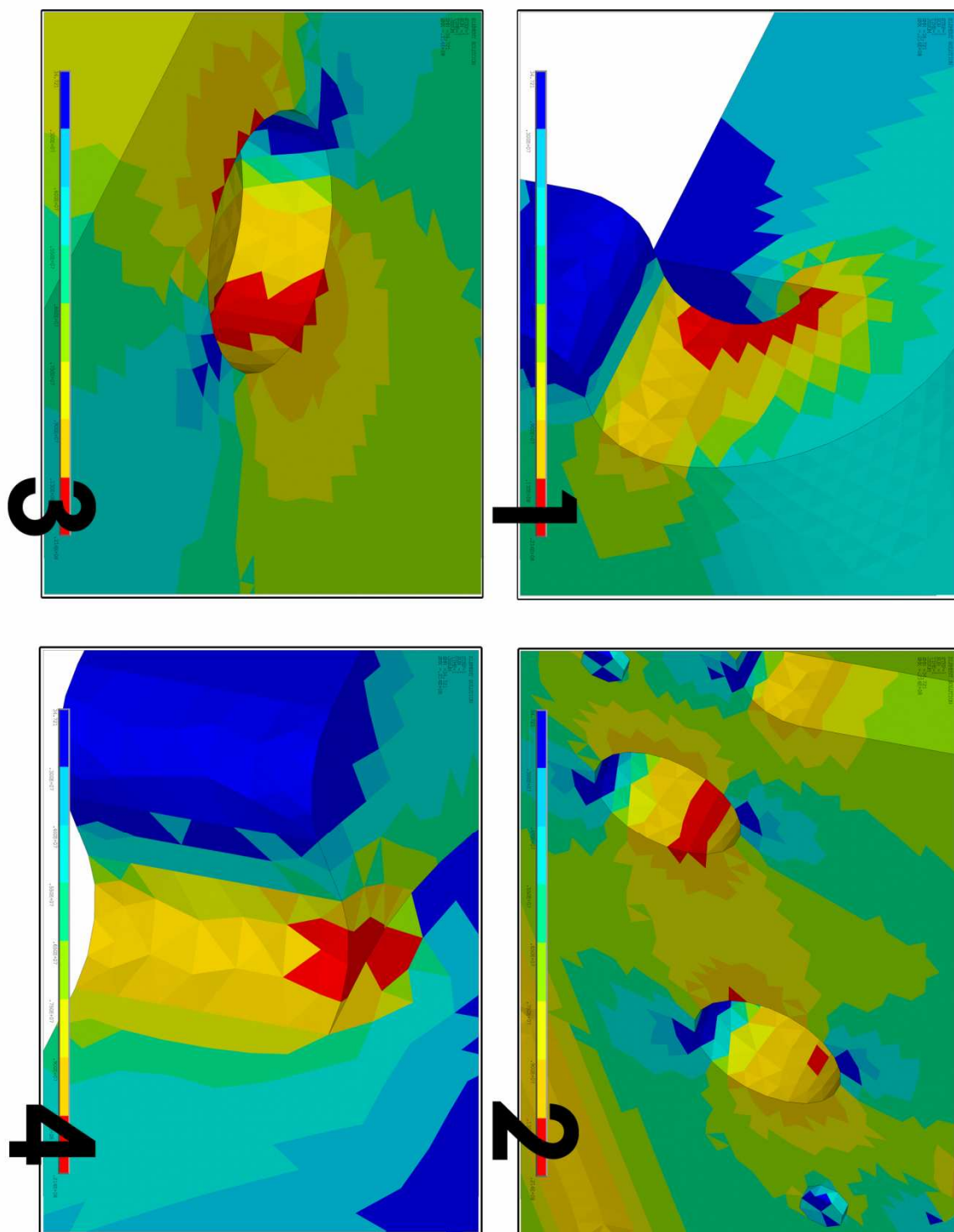


Diagram 2: Porovnání výsledků pro proudovodnou dráhu tloušťky 3mm, při průchodu stejnosměrného proudu o velikosti násobku referenční hodnoty $n \times 3,15$

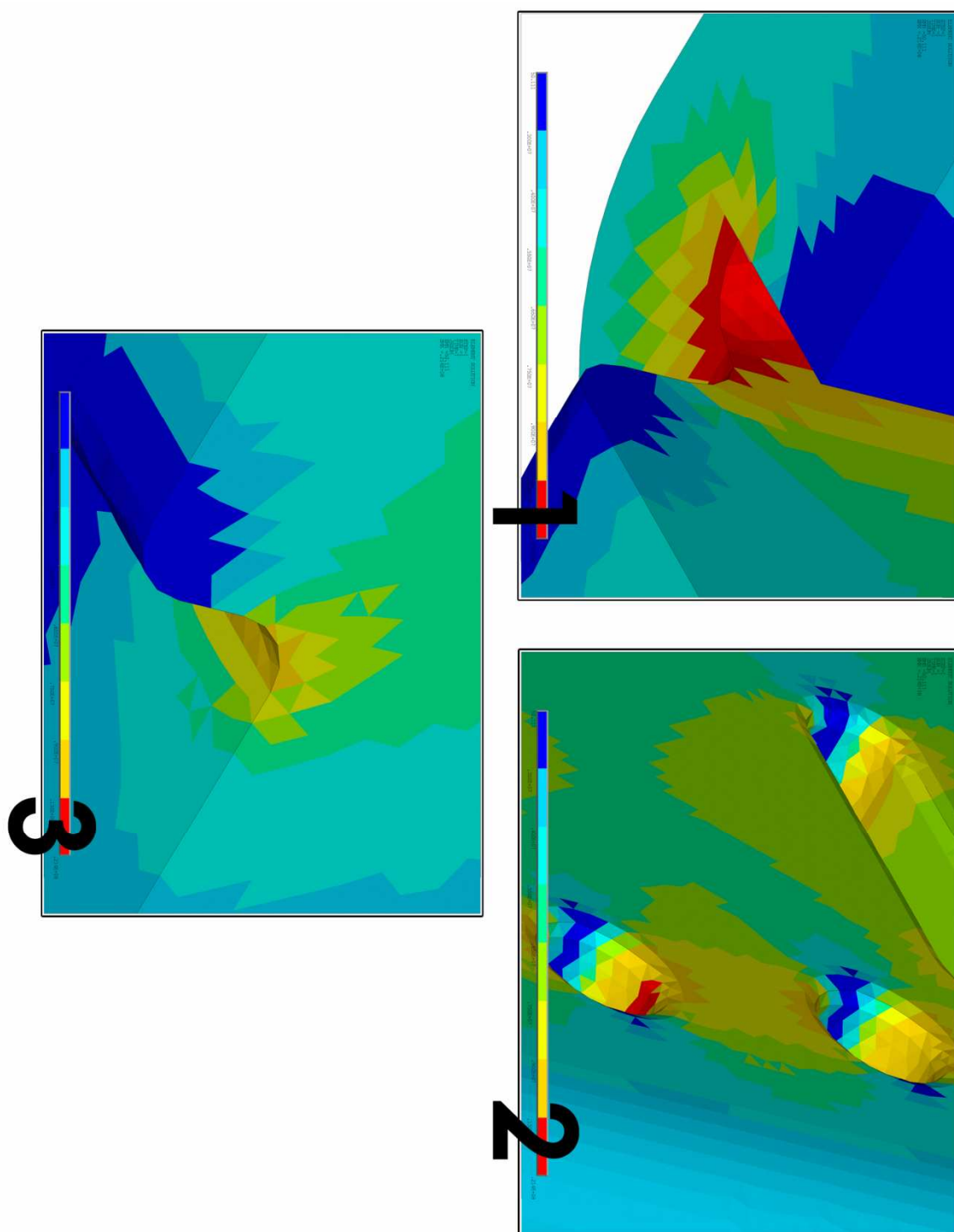
4.2.1 Rozložení proudu



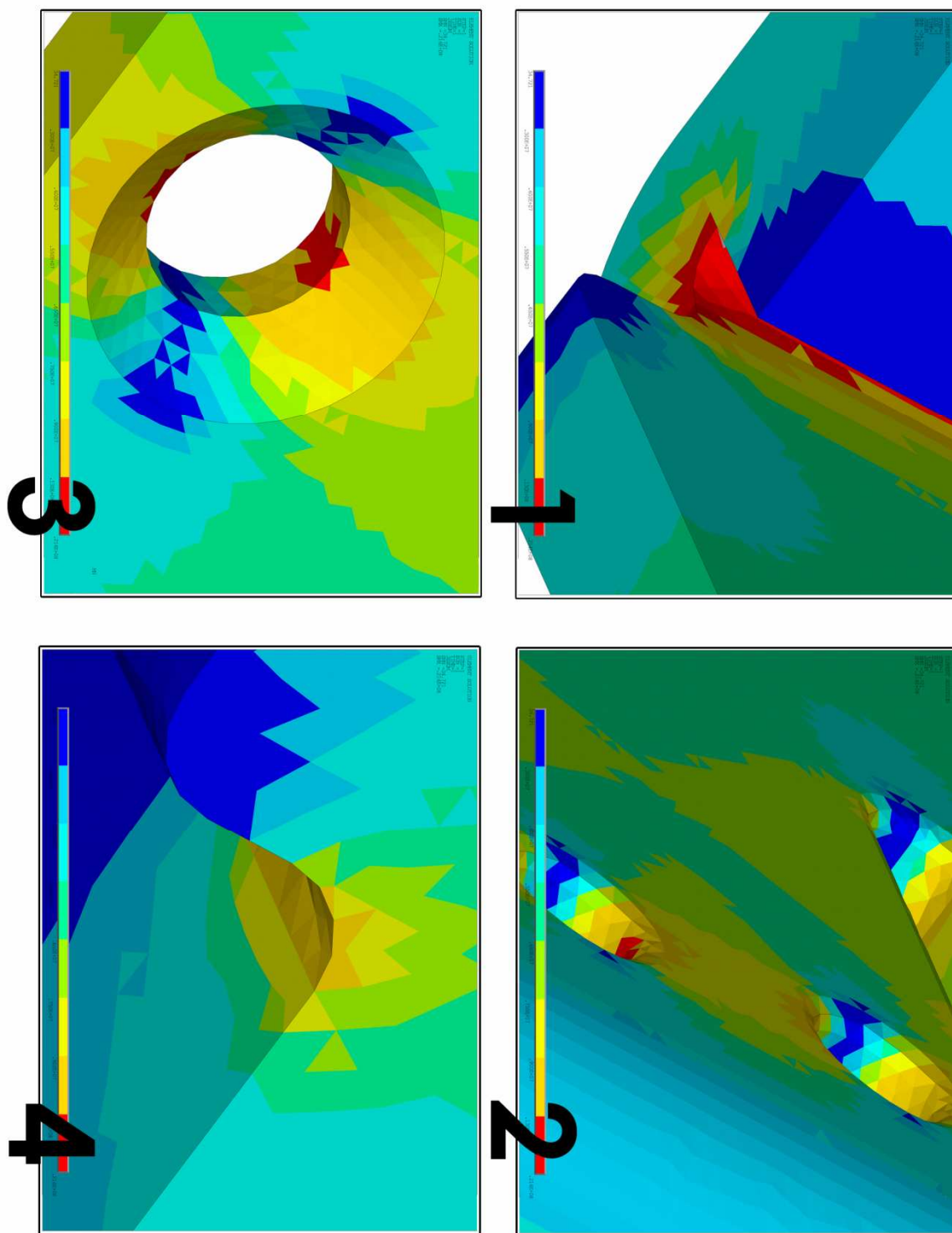
Obrázek 9: Detaily rozložení proudu v celé proudovodné dráze bez otvorů pro uchycení topítka seshora



Obrázek 10: Detaily rozložení proudu v celé proudovodné dráze s otvory pro uchycení topítka seshora

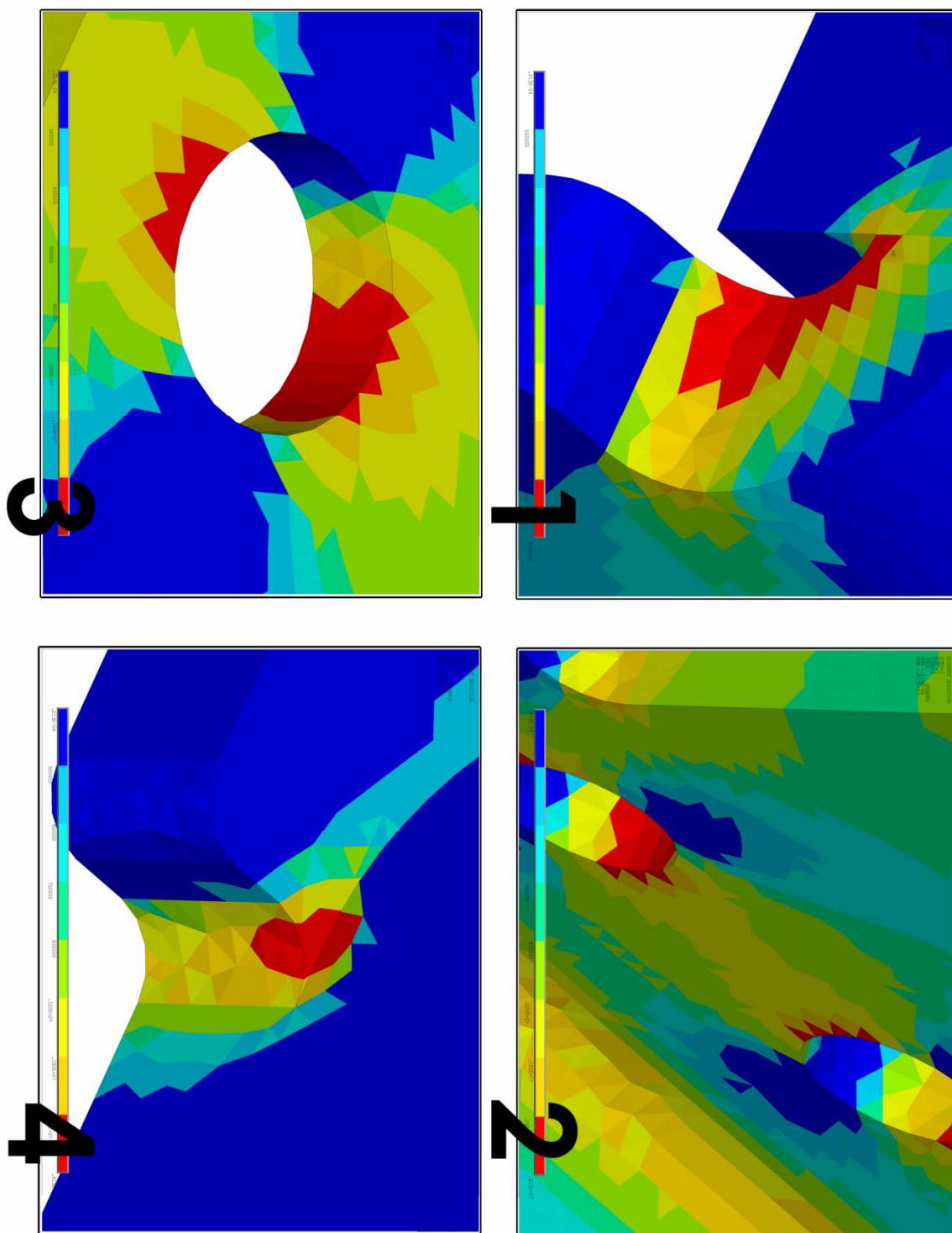


Obrázek 11: Detail rozložení proudu v celé proudovodné dráze bez otvorů pro uchycení topítka zespod

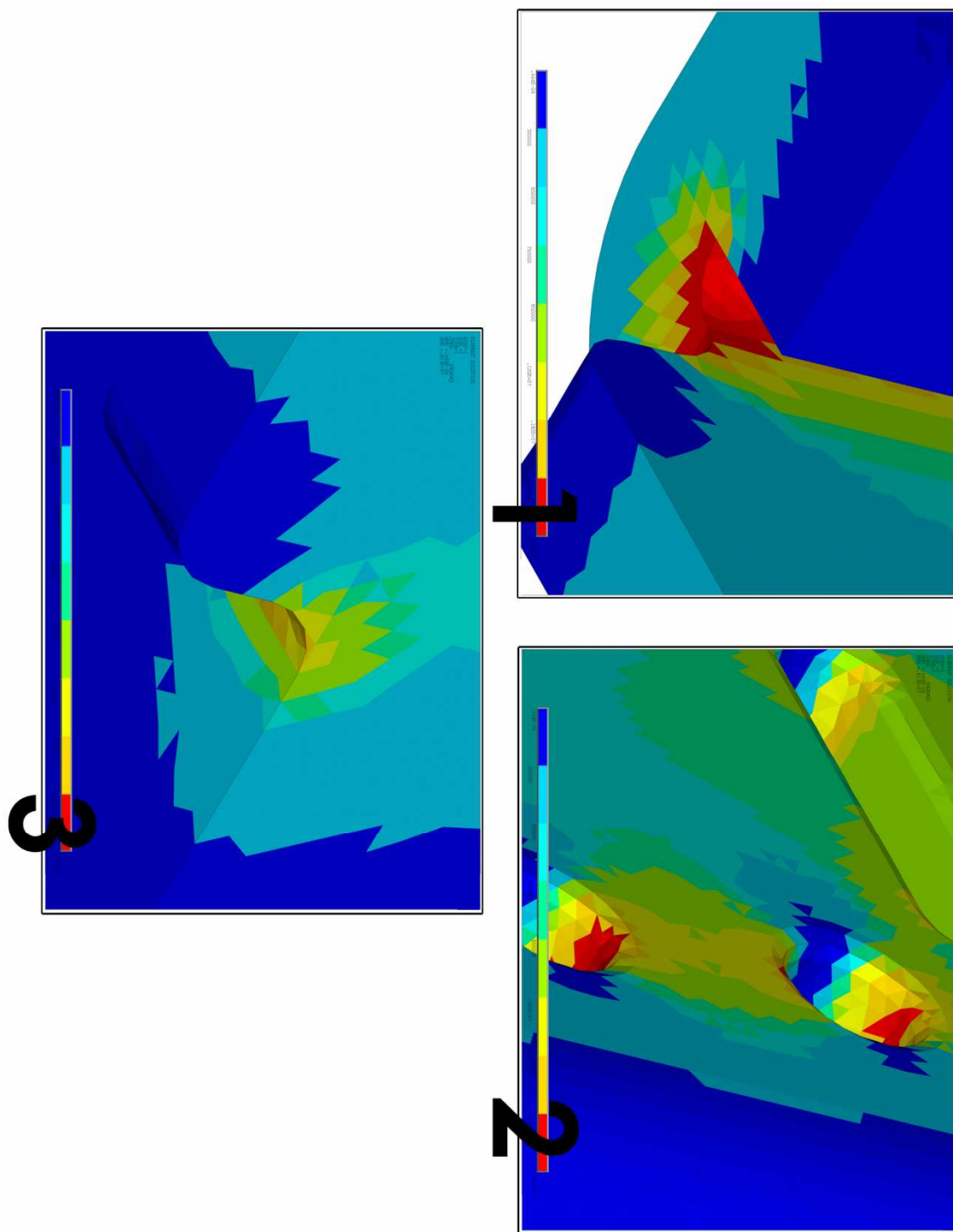


Obrázek 12: Detail rozložení proudu v celé proudovodné dráze s otvory pro uchycení topítka zespod

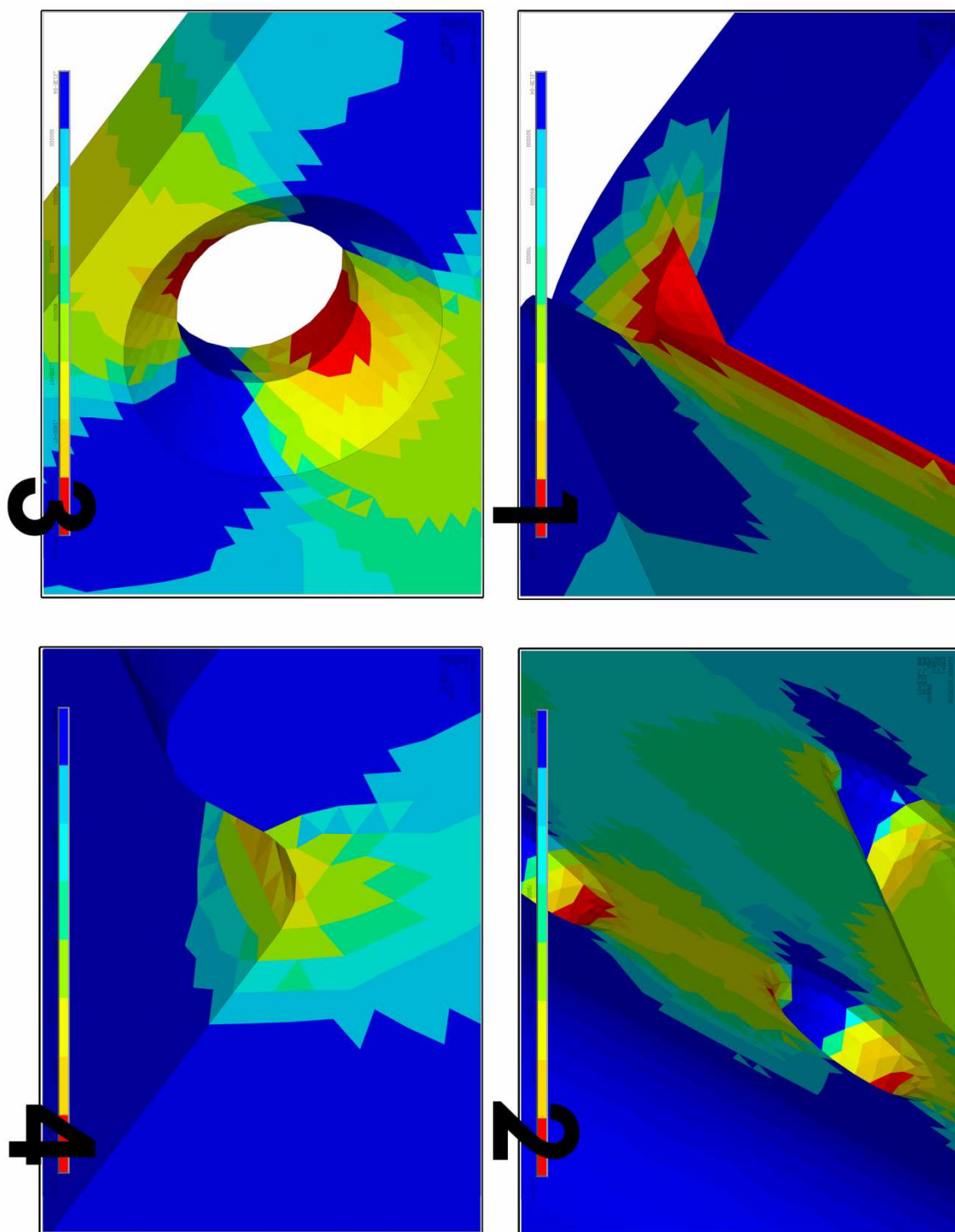
4.2.2 Tepelné ztráty



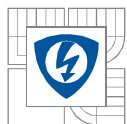
Obrázek 13: Detail tepelných ztrát v celé proudovodné dráze s otvory pro uchycení topítka seshora



Obrázek 14: Detaily tepelných ztrát v celé proudovodné dráze bez otvorů pro uchycení topítka zespod



Obrázek 15: Detail tepelných ztrát v celé proudovodné dráze s otvory pro uchycení topítka zespod



5 ELEKTROMAGNETISMUS

5.1 Povrchový jev (Skin efekt)

Jednorozměrný rovinný případ

Elektromagnetická vlna, která se šíří v prostředí, které je vysoce vodivé, je velmi silně tlumená ve směru svého šíření v důsledku ztrát energie přeměnou na teplo. Účinky elektromagnetické vlny v takovémto prostředí tečou elektrické proudy. Jejich hustota $\vec{J}(\vec{r}, t)$ v izotropním vodivém prostředí s konduktivitou σ na základě Ohmova zákona je

$$\vec{J}(\vec{r}, t) = \sigma \vec{E}(\vec{r}, t) \quad (5.1)$$

Elektrické pole je tedy úměrné proudové hustotě v prostředí. V případě harmonického proudu, je harmonické i elektromagnetické pole a rovnici (5.1) je možné přepsat pro komplexní amplitudy závislé na souřadnicích, tedy

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sigma \vec{E}(\vec{r}) \quad (5.2)$$

Komplexní konstanta šíření je

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} \quad (5.3)$$

Všeobecné řešení rovnice vedení tepla, která se souřadnicí x exponenciálně klesá můžeme zapsat

$$\vec{J}_z(x) = \vec{J}_{z0} e^{-\gamma x} + \vec{J}'_{z0} e^{+\gamma x} \quad (5.4)$$

Kde a jsou integrační konstanty a fyzikálně představují hraniční hodnoty (pro $x=0$) dvou amplitud proudové hustoty, z kterých jedna směrem do vodiče klesá a druhá roste. Je přirozené očekávat, že celková proudová hustota musí směrem do vnitřku materiálu klesat, což znamená, že druhá integrační konstanta $J'_{z0} = 0$. Řešení rovnice (5.4) tedy můžeme zapsat ve tvaru

$$\vec{J}_z(x) = \vec{J}_{z0} e^{-\gamma x} \quad (5.5)$$

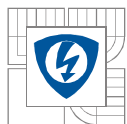
Komplexní konstantu šíření můžeme přepsat do tvaru

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\mu\sigma} = \frac{1+j}{\delta} \quad (5.6)$$

kde je konstanta útlumu udávaná v m^{-1} , případně v debicelech na metr (dB/m) a je fázová konstanta udávaná v radiánech na metr (rad/m). Veličina

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (5.7)$$

udávaná v metrech (m) je hloubka vniku (skinová hloubka - skin depth). Je to charakteristická hloubka, s kterou proudová hustota a současně i elektrické i magnetické pole exponenciálně klesá směrem do vnitřku prostředí (materiálu). V hloubce



poklesne amplituda všech třech veličin na $1/e$ - tinu jejich povrchových hodnot. Tento jev se nazývá povrchovým jevem nebo skin - efektem.

Na základě uvedené analýzy můžeme napsat řešení pro proudovou harmonickou vlnu využitím substitucí (5.6), (5.7) takto

$$\vec{J}_z(x, t) = \vec{J}_{z0} e^{-\frac{x}{\delta}} e^{j\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right)} \quad (5.8)$$

Skutečná proudová hustota v prostředí je reálnou částí výrazu X

$$J_z(x, t) = J_{z0} e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right) \quad (5.9)$$

Z výrazu vidíme, že se jedná o silně tlumenou vlnu proudové hustoty, která postupuje po povrchu materiálu. Proudová hustota v čase kmitá s frekvencí ω .

Vysokofrekvenční proudy tečou pouze ve velmi tenké vrstvě (obalu) povrchu vodiče a směrem do jeho vnitřku se velmi rychle exponenciálně tlumí.

Absolutní hodnotu ztrátové impedance prostředí můžeme zapsat

$$Z_s = \frac{\sqrt{2}}{\sigma \delta} = \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}} \quad (5.10)$$

Magnetickou složku pole potom můžeme zapsat

$$\vec{H} = \frac{\vec{E}}{Z_s} = \frac{\vec{E}}{Z_s} e^{-j\frac{\pi}{4}} \quad (5.11)$$

Využitím tohoto vztahu a vztahů (5.1), (5.8) a (5.9) můžeme výrazy pro harmonickou elektromagnetickou vlnu v dobře vodivém prostředí napsat ve tvaru

$$\vec{H}_z(x, t) = \vec{E}_{z0} e^{-\frac{x}{\delta}} e^{j\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right)} \quad (5.12)$$

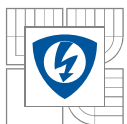
$$\vec{H}_y(x, t) = \frac{\vec{E}_{z0}}{Z_s} e^{-\frac{x}{\delta}} e^{j\left(\omega t - \frac{x}{\delta} - \frac{\pi}{4}\right)} \quad (5.13)$$

nebo pomocí reálných funkcí

$$H_z(x, t) = E_{z0} e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right) \quad (5.14)$$

$$H_y(x, t) = \frac{E_{z0}}{Z_s} e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (5.15)$$

Vidíme, že elektrické a magnetické vektory leží v příčném rovině, směrem do vnitřku vodiče jsou tlumené s charakteristickou hloubkou δ a jsou fázově navzájem posunuty o úhel $\frac{\pi}{4} = 45^\circ$.



5.1.1 Výpočet hloubky vniku pro použité materiály napájené časově proměnným proudem o různých frekvencích

Hloubka vniku pro měď, $f = 50\text{Hz}$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f 4\pi 10^{-7} \frac{1}{\rho_{\text{měď}}}}} = \sqrt{\frac{1}{3,14^2 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \frac{1}{1,78 \cdot 10^{-8}}}} = 9,501\text{mm} \quad (5.16)$$

Hloubka vniku pro měď, $f = 400\text{Hz}$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f 4\pi 10^{-7} \frac{1}{\rho_{\text{měď}}}}} = \sqrt{\frac{1}{3,14^2 \cdot 400 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \frac{1}{1,78 \cdot 10^{-8}}}} = 3,359\text{mm} \quad (5.17)$$

Hloubka vniku pro mosaz $f = 50\text{Hz}$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f 4\pi 10^{-7} \frac{1}{\rho_{\text{mosaz}}}}} = \sqrt{\frac{1}{3,14^2 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \frac{1}{4 \cdot 10^{-8}}}} = 14,243\text{mm} \quad (5.18)$$

Hloubka vniku pro mosaz, $f = 400\text{Hz}$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f 4\pi 10^{-7} \frac{1}{\rho_{\text{mosaz}}}}} = \sqrt{\frac{1}{3,14^2 \cdot 400 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \frac{1}{4 \cdot 10^{-8}}}} = 5,036\text{mm} \quad (5.19)$$

5.1.1.1 Shrnutí výsledků

Hloubka vniku				
	Měď		Mosaz	
	f [Hz]			
	50	400	50	400
μ_0 [-]	0,000001256			
μ_r [-]	1			
π [-]	3,14			
$\rho_{\text{měď}}$ [Ω/m]	1,78E-08	1,78E-08	-	-
ρ_{mosaz} [Ω/m]	-	-	4,00E-08	4,00E-08
γ [S/m]	5,62E+07	5,62E+07	2,50E+07	2,50E+07
δ [m]	0,0095	0,0034	0,0142	0,0050
δ [mm]	9,5009	3,3591	14,2425	5,0355

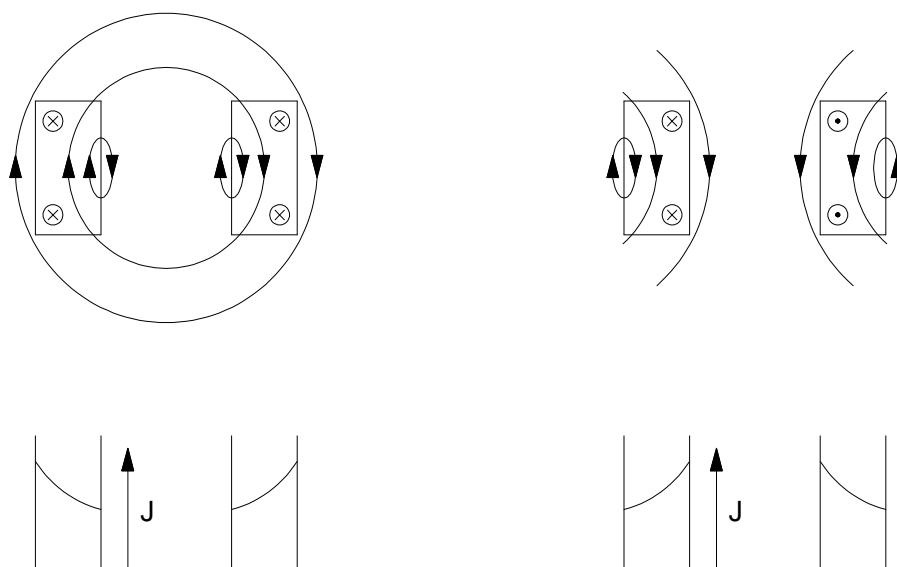
Tabulka 1: Shrnutí výsledků hloubky vniku

5.2 Vliv blízkosti

V praxi často vyskytující se případ, kdy jsou vodiče blízko sebe. V tomto případě svými proudy navzájem ovlivňují své vnitřní magnetické pole. V případě, že bychom uvažovali dva navzájem rovnoběžné vodiče se souběžnými proudy, pak se tyto proudy obrazně řečeno budou vytlačovat k vnějším stranám souběžných vodičů. Tato situace nastává, protože s největším magnetickým tokem je spřažena proudová hustota na vnitřních stranách vodičů.

V opačném případě budeme uvažovat proudy procházející protiběžně, kde by byla největší proudová hustota u vnitřních stěn vodičů. Uvažujeme časově proměnné pole, které je způsobeno časově proměnnými proudy, tedy elektrodynamické jevy.

Pokud by se vodič nacházel v blízkosti feromagnetika, vznikly by ve feromagnetiku také proudy. Opět by došlo ke vzniku povrchového jevu, který by vedl ke zvýšení proudové hustoty na odvrácené straně vodiče. V případě tohoto jevu se uplatňují vířivé proudy ve feromagnetiku. Příklady jevu blízkosti jsou na Obr. 16.



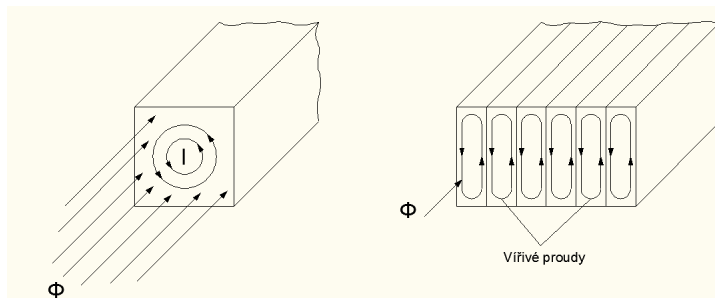
Obr

ázek 16: Vliv jevu blízkosti při souběžném a protiběžném průchodu proudu vodiči

[8]

5.3 Vířivé proudy

Pokud uvažujeme masivní vodič nacházející se v časově proměnném magnetickém poli nebo pokud se v takovém poli pohybuje, indukuje se v něm napětí. Indukované napětí vyvolává proudy. Proudů působí podle Lenzova pravidla (pravidlo určující směr elektrického proudu indukovaného časovou změnou magnetického pole) proti příčině, která je vyvolala, což vyplývá ze zákonů zachování energie pro elektromagnetické jevy, a uzavírají se v plochách kolmých na směr indukčních čar magnetického toku po cestách nejmenšího odporu. Tyto proudy se označují jako vířivé.



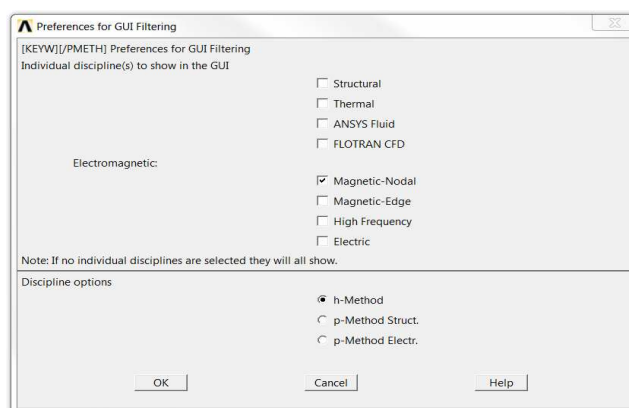
Obrázek 17: Vířivé proudy masivním vodičem Obrázek 18: Vířivé proudy v izolovaných plechách

Proudů dosahují velkých hodnot, protože odpor masivního vodiče je malý. Proudů vodič zahřívají. Zahříváním vodiče vznikají tepelné ztráty Jouleovým teplem. Pro minimalizování ztrát se sestavují jádra elektrických strojů (transformátorů, motorů, atd.) ze vzájemně izolovaných plechů. Plechy se skládají tak, aby magnetický tok protékal ve směru roviny plechů, jak zobrazuje Obr. 18. Vířivé proudy potom protékají po delších cestách, tenčími průřezy a je jim tím pádem kladen větší elektrický odpor. Ztráty jsou tedy značně menší oproti případu jednoho masivního vodiče. Ztráty vířivými proudy jsou závislé na druhé mocnině maximální indukce, druhé mocnině frekvence, tloušťce a hmotnosti plechů.

[8]

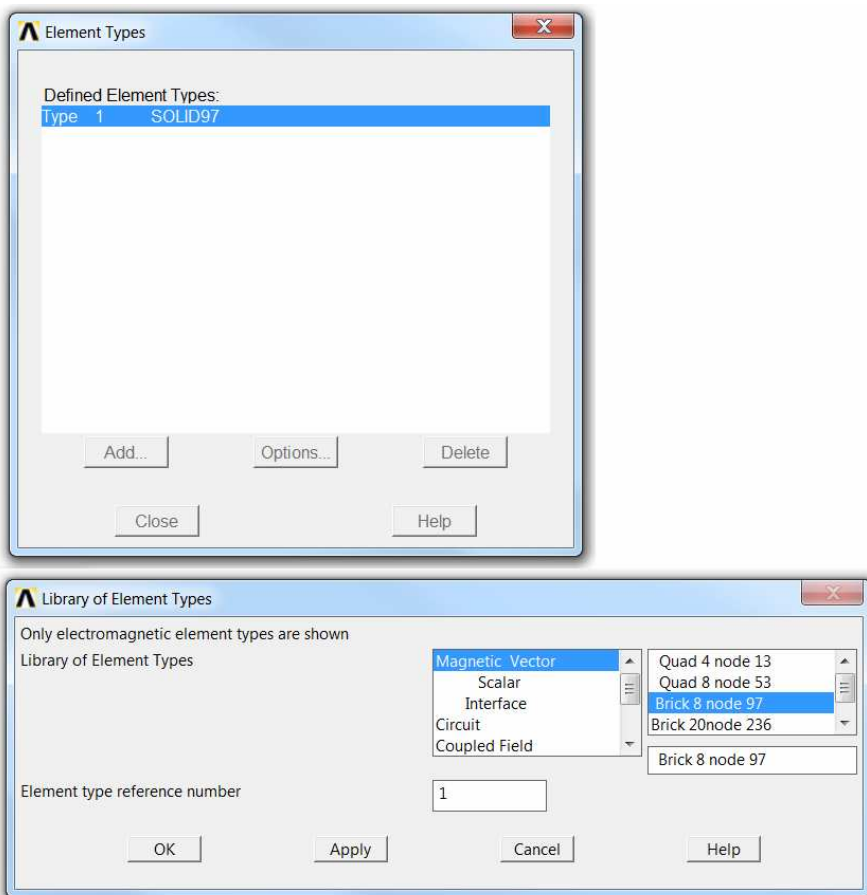
5.4 Postup simulace

Postup simulace je v podstatě stejný jako v případě stejnosměrného proudu. Liší se pouze ve volbě analýzy, kde je zvolena analýza Magnetic - Nodal jak je zobrazeno na Obr. 19.

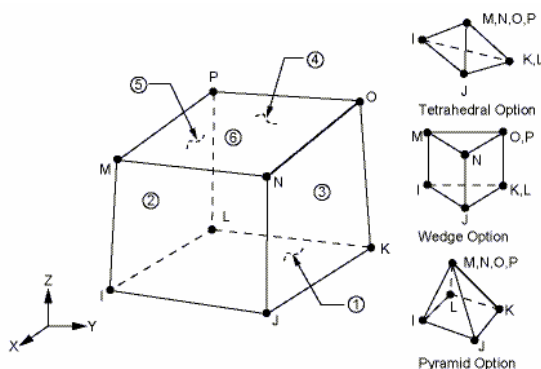


Obrázek 19: Filtrování použitých analýz

Další změnou oproti simulacím pro stejnosměrnému proudu je volba použitého typu elementu. V případě časově proměnného proudu byl zvolen element SOLID97 což je typ BRICK 8 NODE 97 jak je patrné na Obr. 20 a Obr. 21. Element SOLID97 je určen pro tří rozměrné magnetické pole. Prvek má osm uzlů s pěti stupni volnosti, napětí a proudu v každém uzlu.



Obrázek 20: Volba elementu SOLID97



Obrázek 21: SOLID97

6 PRAKTICKÝ PŘÍKLAD MĚŘENÍ PŘÍDAVNÝCH ZTRÁT PŘÍMOČARÉHO PLNÉHO VODIČE KRUHOVÉHO PRŮŘEZU

6.1 Úvod

Úkolem byl výpočet ztrát při průchodu proudu plným vodičem kruhového průřezu. Výpočet byl proveden pro stejnosměrný a střídavý proud o frekvenci 50 a 400Hz nejdříve numericky podle níže uvedeného postupu a následně pomocí programu Ansys. Získané výsledky byly navzájem porovnány, aby bylo možné ověřit přesnost výpočtů programem Ansys, které jsou obsažené v této práci. Materiálem vodiče je měď s měrným odporem $\rho_{293} = 1,77 \cdot 10^{-8}$. Výpočty jsou prováděny pro pokojovou teplotu 20°C (293K).

6.2 Rozbor numerické části úlohy

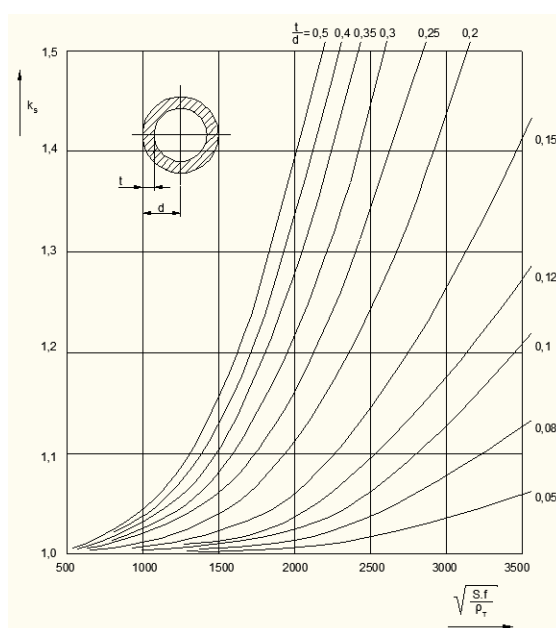
Činný odpor vodiče o průřezu S a délce l je dán vztahem

$$R = k_s \cdot \rho_{293} \cdot \frac{l}{S} \quad (6.1)$$

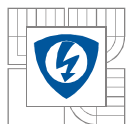
Činitel k_s zahrnuje vliv povrchového jevu na velikosti činného odporu vodiče, který je způsobený průchodem střídavého proudu, tj. pro stejnosměrný proud je $k_s = 1$ a pro střídavý proud je $k_s > 1$. Tento činitel závisí na výrazu

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{293}}} \quad (6.2)$$

6.3 Graf



Graf 1: Grafické závislosti činitele k_s na výrazu (6.2)



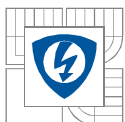
Aby bylo možné odečíst z grafu co nejpřesnější činitel k_s , tak bylo nutné zvolit dvě různé geometrie. Pro frekvenci 50Hz byl zvolen průměr vodiče 42,5mm, aby výraz na kterém činitel závisí vyšel přibližně 2000 a činitel k_s byl po odečtení z grafu 3 roven 1,4. Pro frekvenci 400Hz byl zvolen stejný postup s průměrem vodiče 15mm. Zvolené geometrie pro 50 a 400Hz jsou v tabulce 2 a výsledky výpočtů jsou zahrnuty v tabulce 3 a 4.

Zvolené parametry výpočtů					
	50Hz		400Hz		
S	1417,91 [mm ²]	0,001418 [m ²]	176,63 [mm ²]	0,000177 [m ²]	
d	42,50 [mm]	0,0425 [m]	15,00 [mm]	0,015 [m]	
r	21,25 [mm]	0,02125 [m]	7,50 [mm]	0,00750 [m]	
f	50 [Hz]	50 [Hz]	400 [Hz]	400 [Hz]	
ρ	1,77E-08 [Ω.m]	1,77E-08 [Ω.m]	1,77E-08 [Ω.m]	1,77E-08 [Ω.m]	
l	1000 [mm]	1 [m]	1000 [mm]	1 [m]	
I	890,82 [A]	890,82 [A]	890,82 [A]	890,82 [A]	

Tabulka 2: Zvolené parametry a podmínky výpočtu

Kontrolní výpočet			
		Stejnoseměrný proud	Střídavý proud 50Hz
Numerický výpočet			
Výraz			2001,346
Činitel výrazu	$k_s [-]$	1	1,4
Činný odpor	R [Ω]	0,00001248	0,00001748
Ztráty	P [W]	4,955	6,936
Ansys			
Ztráty	P [W]	4,962	7,056
Odchylka	ξ [%]	0,159	1,726

Tabulka 3: Kontrolní výpočet zvolené geometrie pro střídavý proud 50Hz

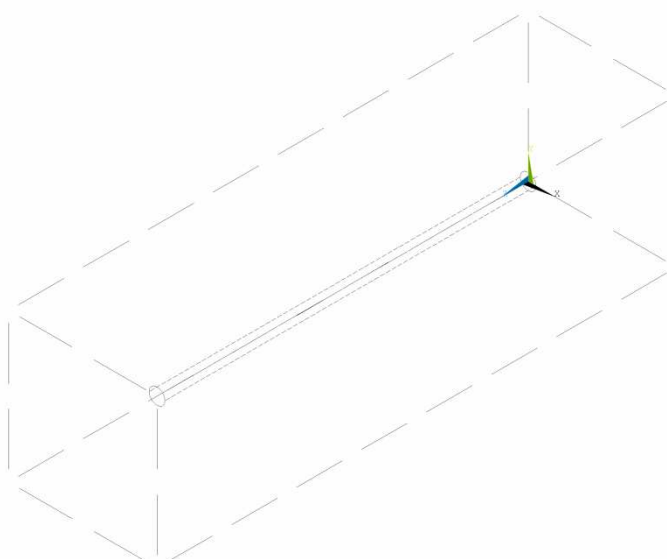


Kontrolní výpočet			
		Stejnoseměrný proud	Střídavý proud 400Hz
Numerický výpočet			
Výraz		1997,880	
Činitel výrazu	$k_s [-]$	1	1,4
Činný odpor	$R [\Omega]$	0,00010021	0,00014030
Ztráty	$P [W]$	39,774	55,684
Ansys			
Ztráty	$P [W]$	39,994	56,991
Odchylka	$\xi [\%]$	0,551	2,347

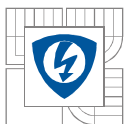
Tabulka 4: Kontrolní výpočet zvolené geometrie pro střídavý proud 400Hz

6.4 Grafické rozložení simulace

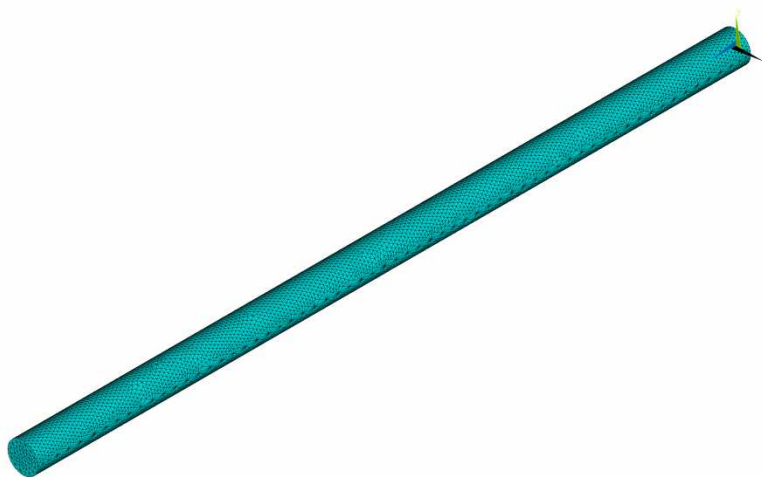
VOLPES
TYPE 10M



Obrázek 22: Umístění simulované tyče ve vzduchovém obalu

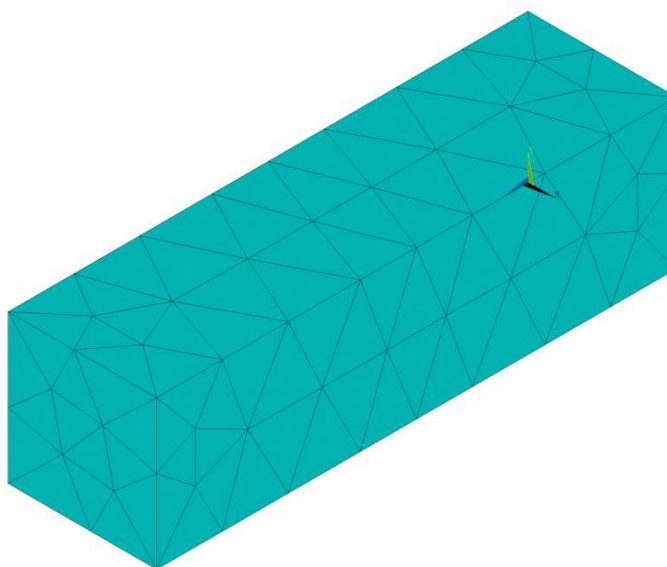


ELEMENTS

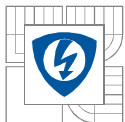


Obrázek 23: Vytvořená síť prvků na simulované tyči

ELEMENTS

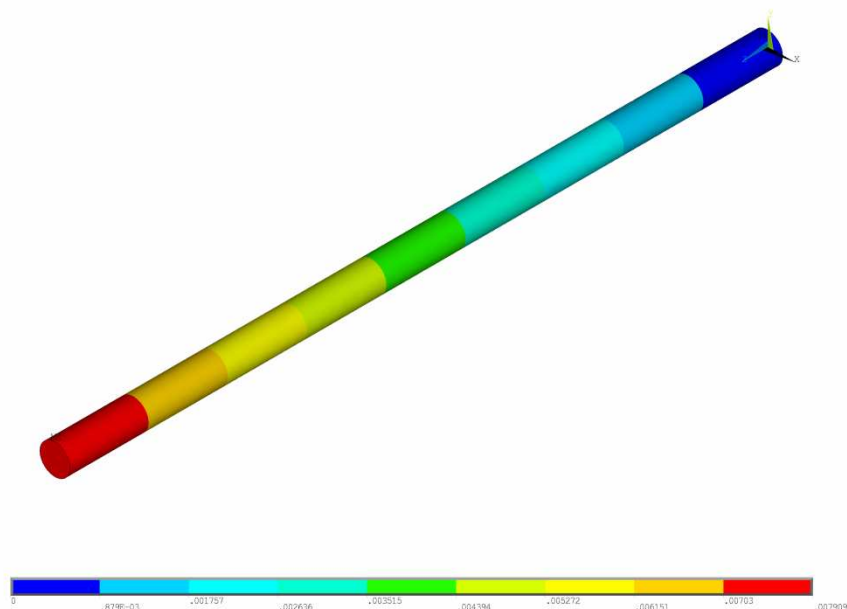


Obrázek 24: Vytvořená síť prvků na vzduchovém obalu



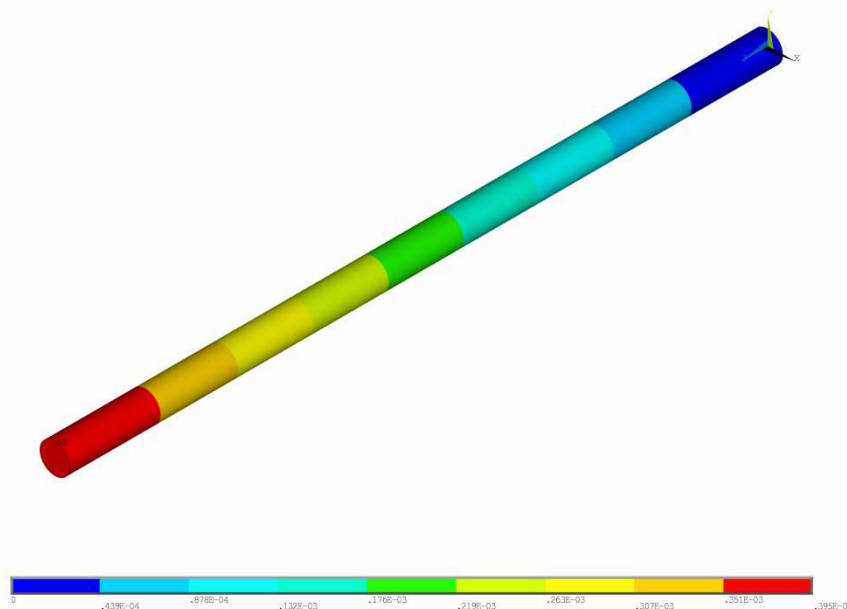
6.4.1 Úbytky napětí

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
VOLT =0 (VOLT)
SYS=0
SNV =-.007909



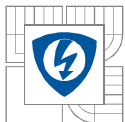
Obrázek 25: Úbytek stejnosměrného napětí na simulované tyči

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =3
TIME=1
VOLT=11282 (VOLT)
SYS=0
SNV =-.295E-03



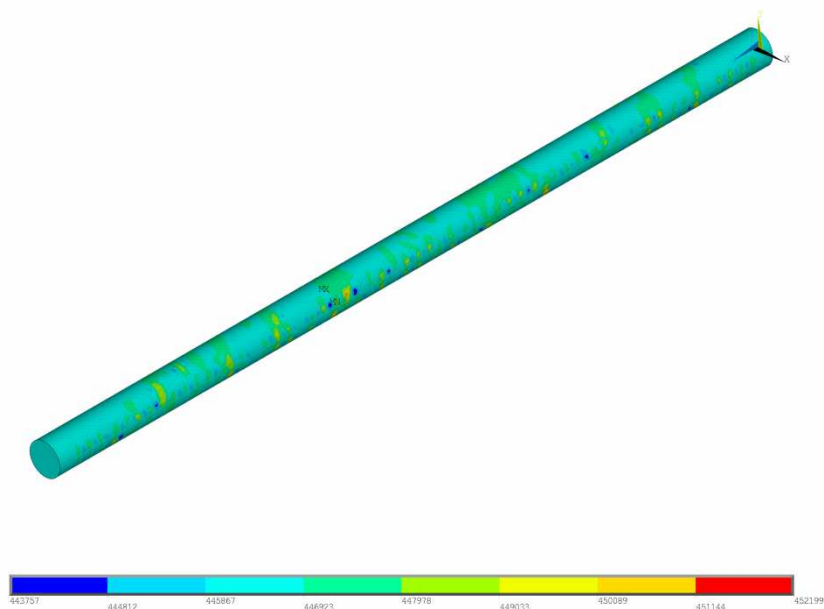
Obrázek 26: Úbytek střídavého napětí o frekvenci 50Hz na simulované tyči

Pro výpočet úbytku střídavého napětí používá Ansys integrál, který nemá stanovené meze integrace a proto není možné považovat vypočtené úbytky napětí v tomto případě za pravdivé.



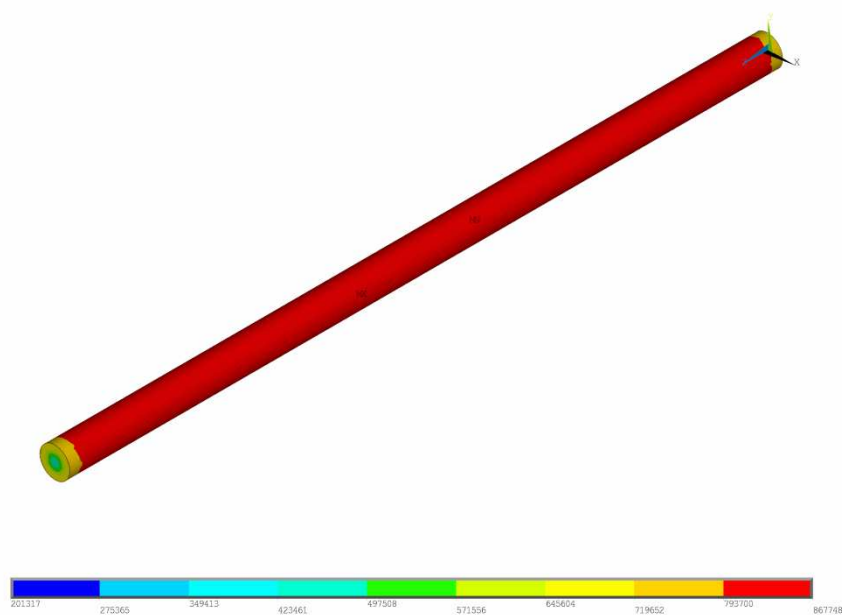
6.4.2 Rozložení proudu

AVG ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
JSDM (AVG)
SMI -443757
SMX -452199

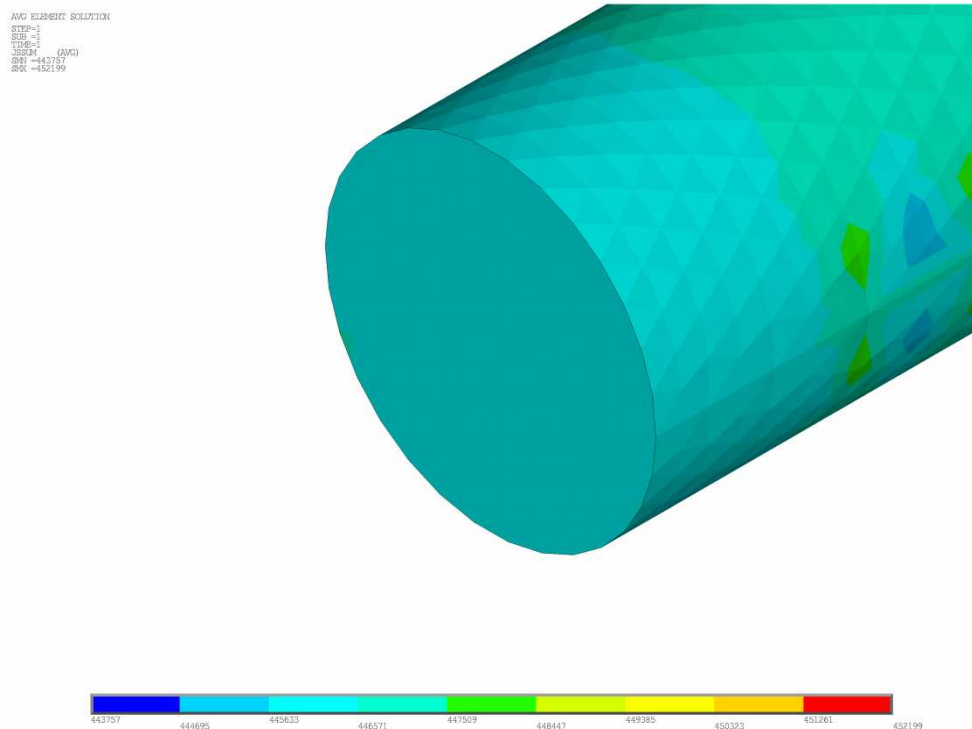
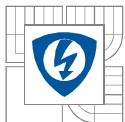


Obrázek 27: Rozložení hustoty stejnosměrného proudu v simulované tyči

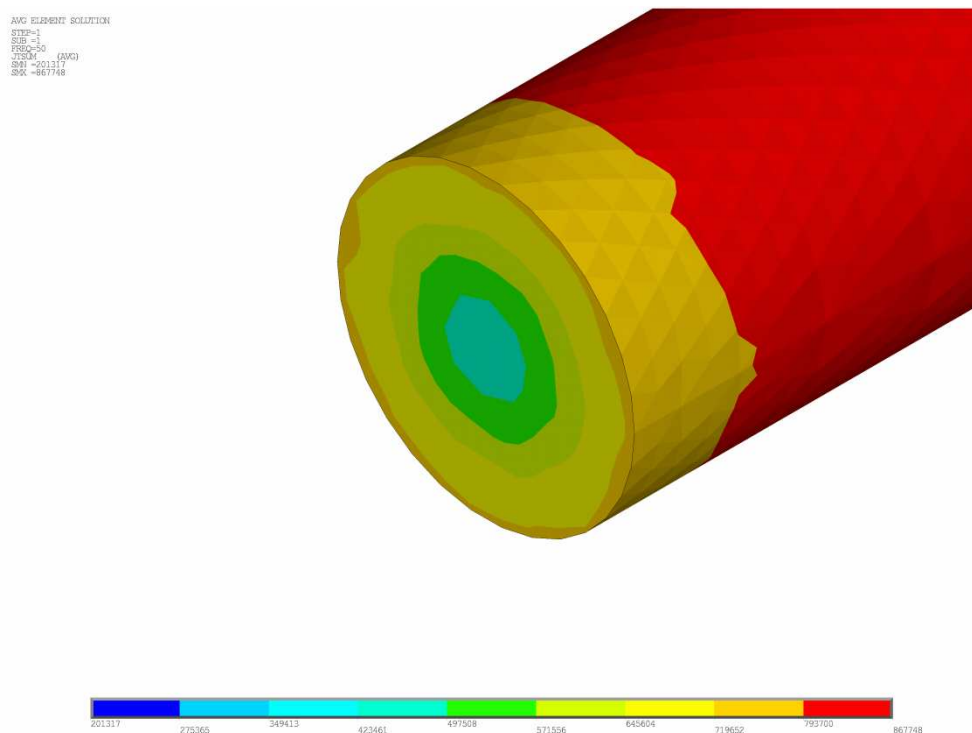
AVG ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =1
FREQ=50
JSDM (AVG)
SMI -201317
SMX -867748



Obrázek 28: Rozložení hustoty střídavého proudu o frekvenci 50Hz v simulované tyči



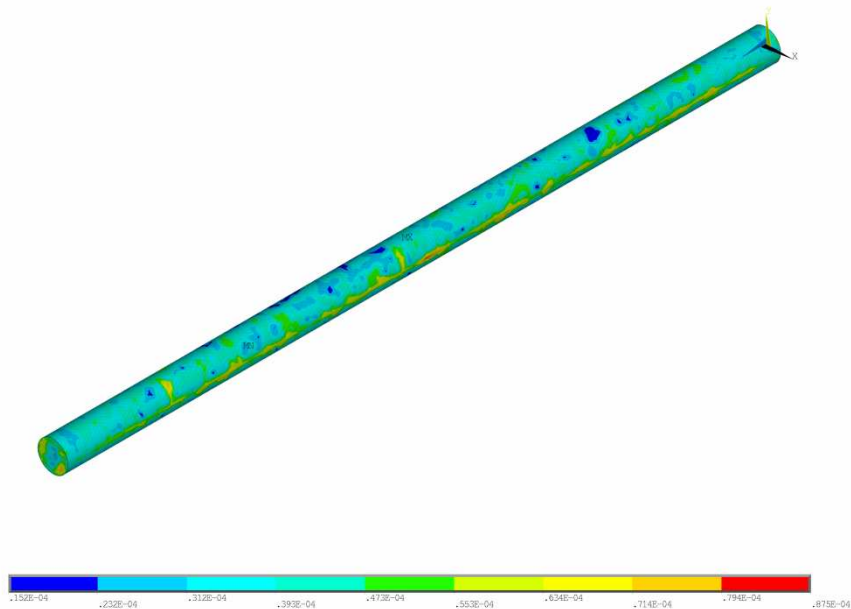
Obrázek 29: Detail vstupní části simulované tyče v případě rozložení hustoty stejnosměrného proudu



Obrázek 30: Detail vstupní části simulované tyče v případě rozložení hustoty střídavého proudu o frekvenci 50Hz

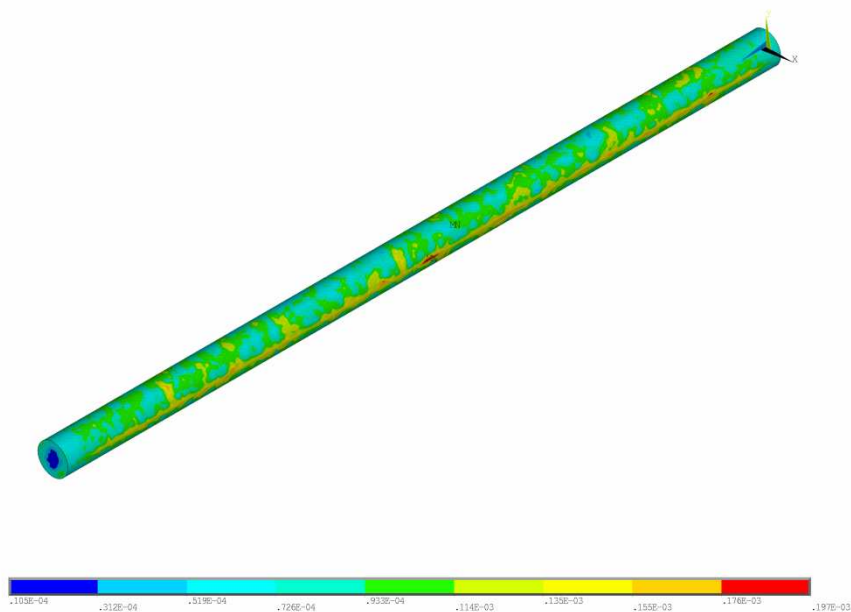
6.4.3 Tepelné ztráty

AVG ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB=1
TIME=1
HEAT=1 (AVG)
S81 = 1.52E-04
S8X = .875E-04

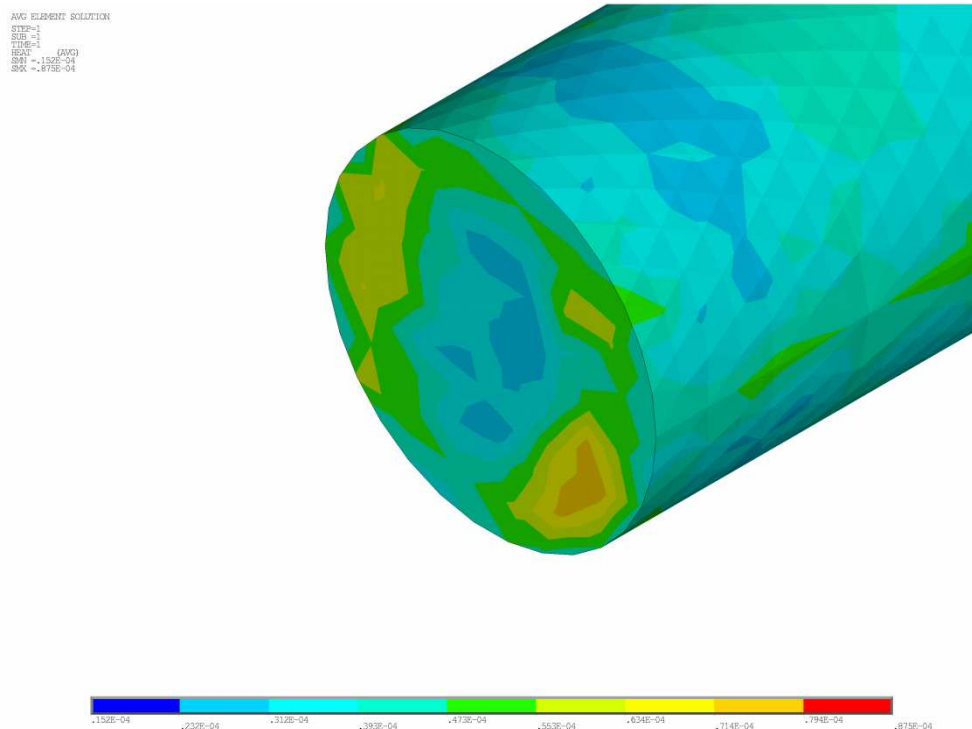


Obrázek 31: Rozložení tepelných ztrát při průchodu stejnosměrného proudu simulovanou tyčí

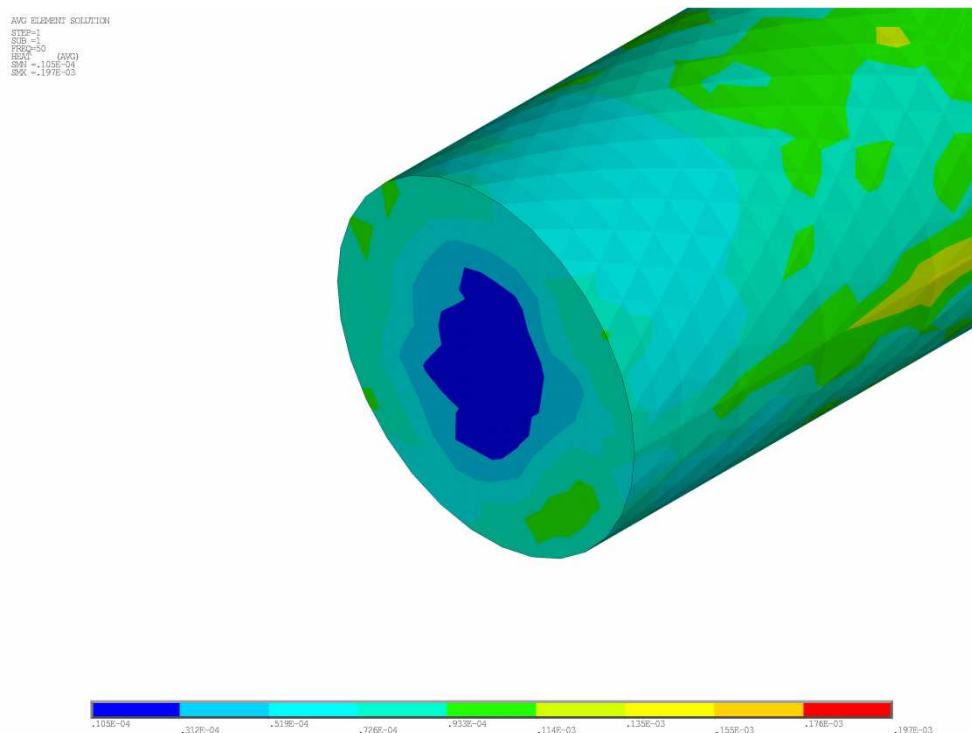
AVG ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB=1
FREQ=50
HEAT=1 (AVG)
S81 = 1.02E-04
S8X = .197E-03



Obrázek 32: Rozložení tepelných ztrát při průchodu střídavého proudu o frekvenci 50Hz simulovanou tyčí

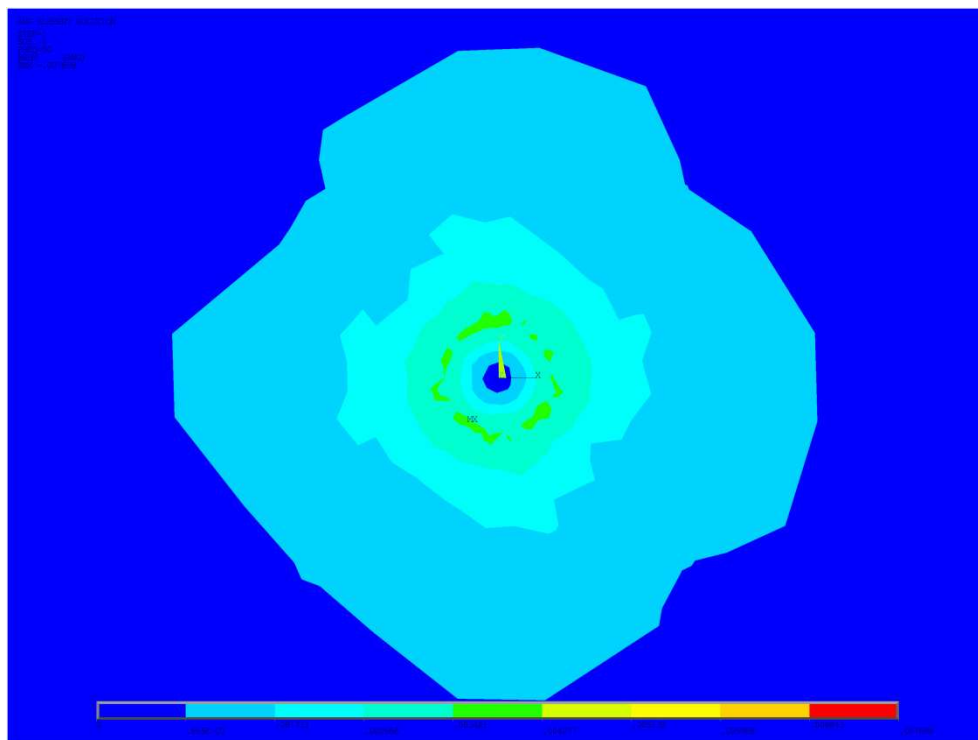


Obrázek 33: Detail vstupní části simulované tyče v případě tepelných ztrát způsobených průchodem stejnosměrného proudu

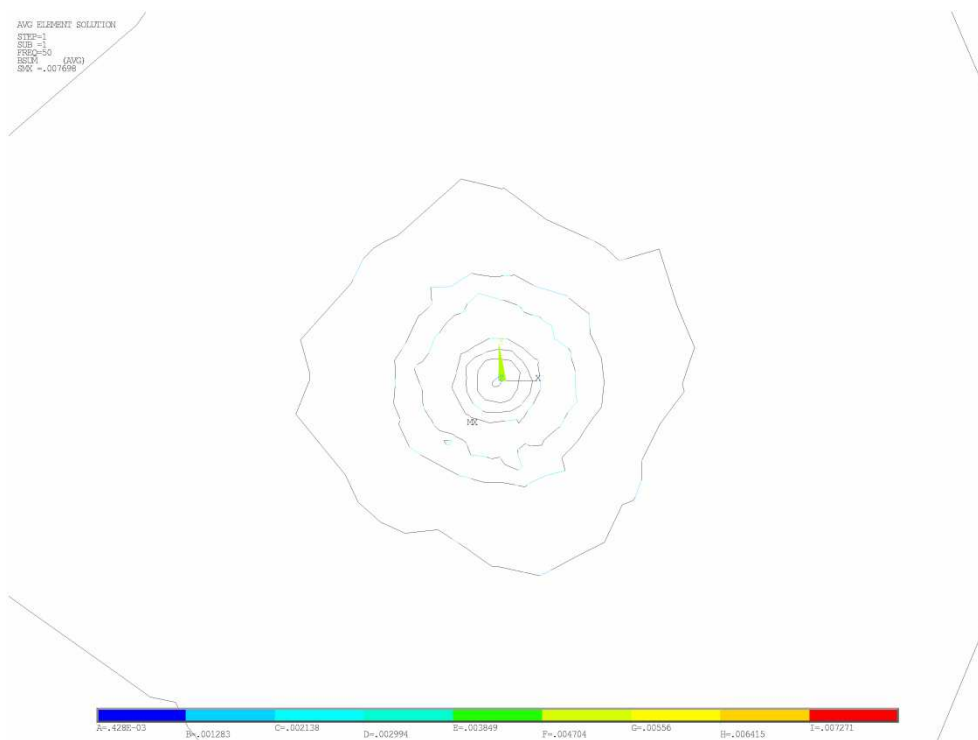


Obrázek 34: Detail vstupní části simulované tyče v případě tepelných ztrát způsobených průchodem střídavého proudu o frekvenci 50Hz

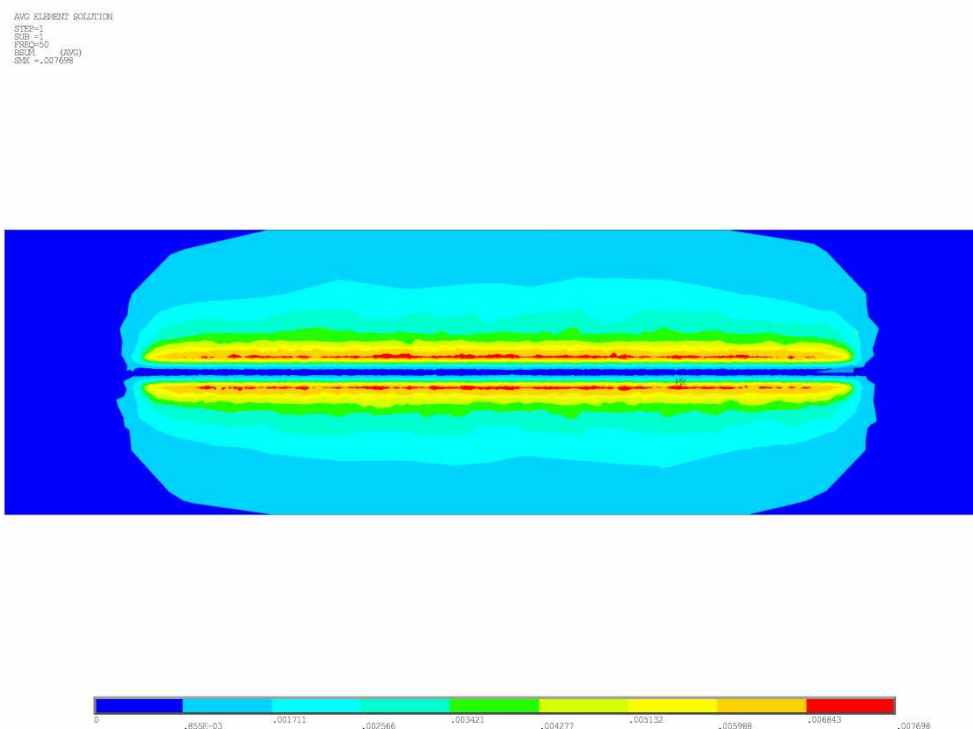
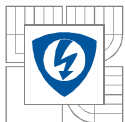
6.4.4 Magnetická indukce



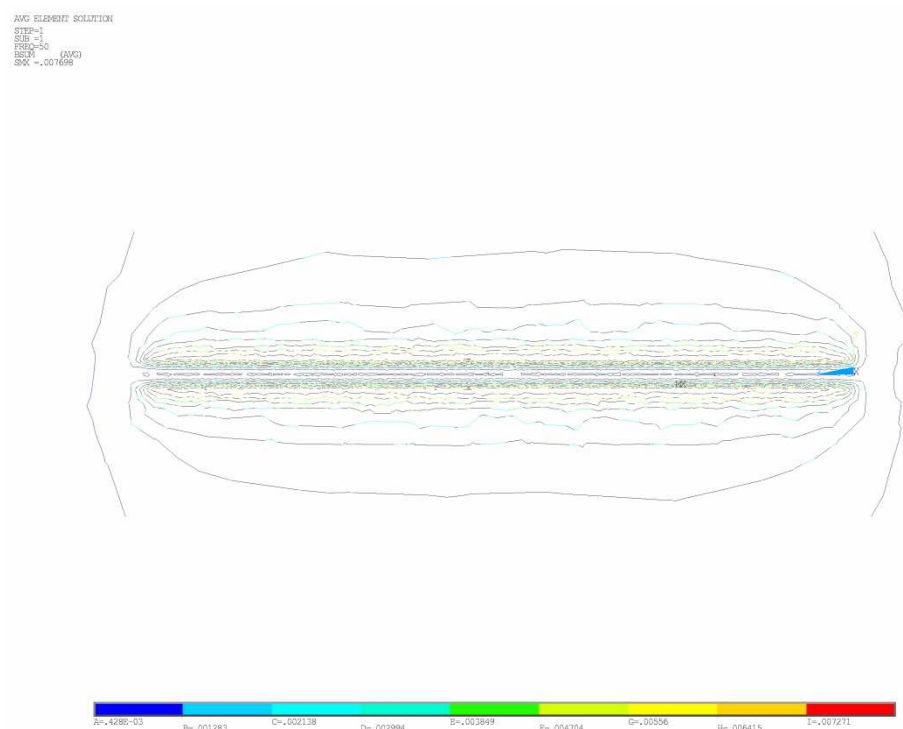
Obrázek 35: Grafické rozložení magnetické indukce v podélném směru procházejícího střídavému proudu o frekvenci 50Hz



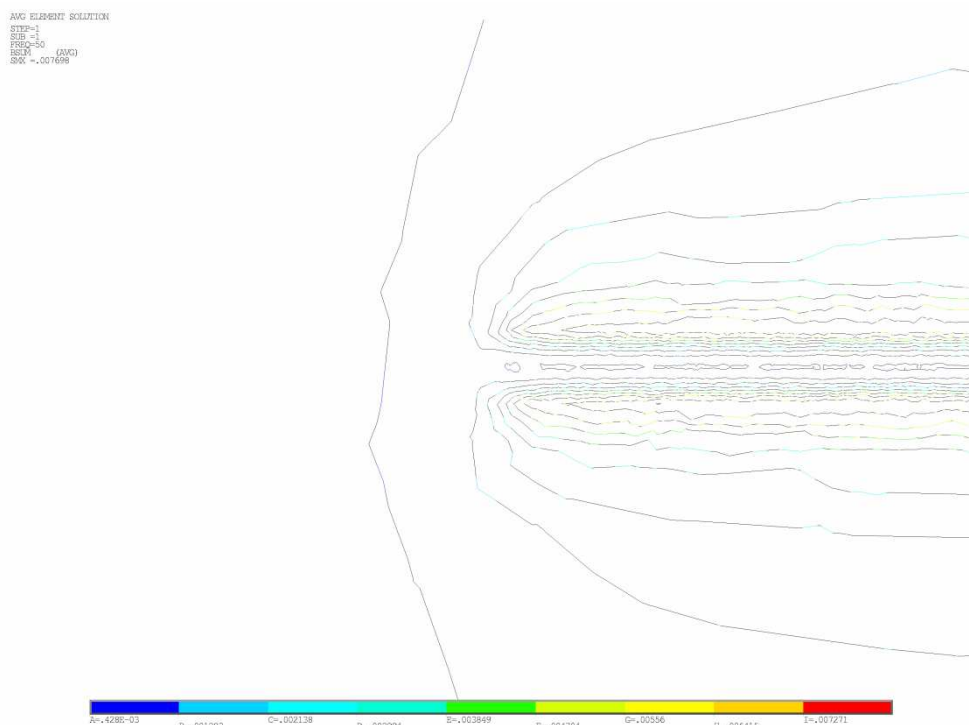
Obrázek 36: Vektorové rozložení magnetické indukce v podélném směru procházejícího střídavého proudu o frekvenci 50Hz



Obrázek 37: Grafické rozložení magnetické indukce ve směru kolmém k procházejícímu střídavému proudu o frekvenci 50Hz



Obrázek 38: Vektorové rozložení magnetické indukce ve směru kolmém k procházejícímu střídavému proudu o frekvenci 50Hz



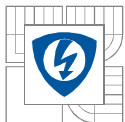
Obrázek 39: Detail vstupní části simulované tyče v případě rozložení magnetické indukce ve směru kolmém k procházejícímu střídavému proudu o frekvenci 50Hz

6.5 Shrnutí

Pro dostatečně přesný výsledek bylo nezbytné vytvořit dvě různé geometrie simulované tyče a to pro frekvenci 50Hz a 400Hz, aby bylo možné odečíst z grafu 3 co nejpřesnější činitel k_s potřebný pro další výpočet. Rozměry použitých geometrií jsou umístěny v tabulce 2.

Při průchodu střídavého proudu o frekvenci 50Hz byly vypočteny tepelné ztráty pomocí programu Ansys 7,056W a pomocí numerické metody byly vypočteny ztráty 6,936W, což činí odchylku numerického výpočtu oproti výpočtu pomocí programu Ansys 1,726%. Na stejné geometrii byly provedeny stejné výpočty pro průchod stejnosměrného proudu a tepelné ztráty pomocí numerického výpočtu vyšly 4,955W a pomocí výpočtu programem Ansys tepelné ztráty vyšly 4,962W, což činí odchylku numerického výpočtu oproti výpočtu pomocí programu Ansys 0,159%. Získané výsledky jsou umístěny v tabulce 3.

Při průchodu střídavého proudu o frekvenci 400Hz byly vypočteny tepelné ztráty pomocí programu Ansys 56,991W a pomocí numerické metody byly vypočteny ztráty 55,684W, což činí odchylku numerického výpočtu oproti výpočtu pomocí programu Ansys 2,347%. Na stejné geometrii byly provedeny stejné výpočty pro průchod stejnosměrného proudu a tepelné ztráty pomocí numerického výpočtu vyšly 39,774W a pomocí výpočtu programem Ansys tepelné ztráty vyšly 39,994W, což činí odchylku numerického výpočtu oproti výpočtu pomocí programu Ansys 0,551%. Získané výsledky jsou umístěny v tabulce 4.



Získané odchylky numerických výpočtů v porovnání s výpočty programem Ansys poukazují na přesnost výpočtu v případě použití programu Ansys. Odchylka výpočtů byla ovlivněna nepřesným odčítáním koeficientu k_s z grafu 3 v případě numerického výpočtu a volbou velikosti elementů sítě prvků jak na simulované tyči, tak ve vzduchovém okolí. Výsledek je v obou případech také ovlivněný počtem desetinných míst čísel dosazovaných do výpočtu.

Výpočet je doplněný grafickými výstupy programu Ansys, kde jsou porovnány výsledky získané pro průchod stejnosměrného proudu a pro průchod střídavého proudu o frekvenci 50Hz, které odpovídají simulované geometrii tyče pro frekvenci 50Hz. Jak je patrné z Obr. 27, který znázorňuje rozložení hustoty stejnosměrného proudu v simulované tyči, proudová hustota je v celém objemu tyče rozložena rovnoměrně. Zatímco při průchodu střídavého proudu o frekvenci 50Hz simulovanou tyčí dochází k vytlačování hustoty proudu směrem k povrchu vodiče jak je znázorněno na Obr. 28. Jedná se o takzvaný *skinefekt*, který je popsán v kapitole 5.1. Na závěr tohoto porovnání je na Obr. 36 znázorněna magnetická indukce v podélném směru a na Obr. 38 ve směru příčném k procházejícímu proudu.

7 STŘÍDAVÝ PROUD , JEDNA PROUDOVODNÁ DRÁHA

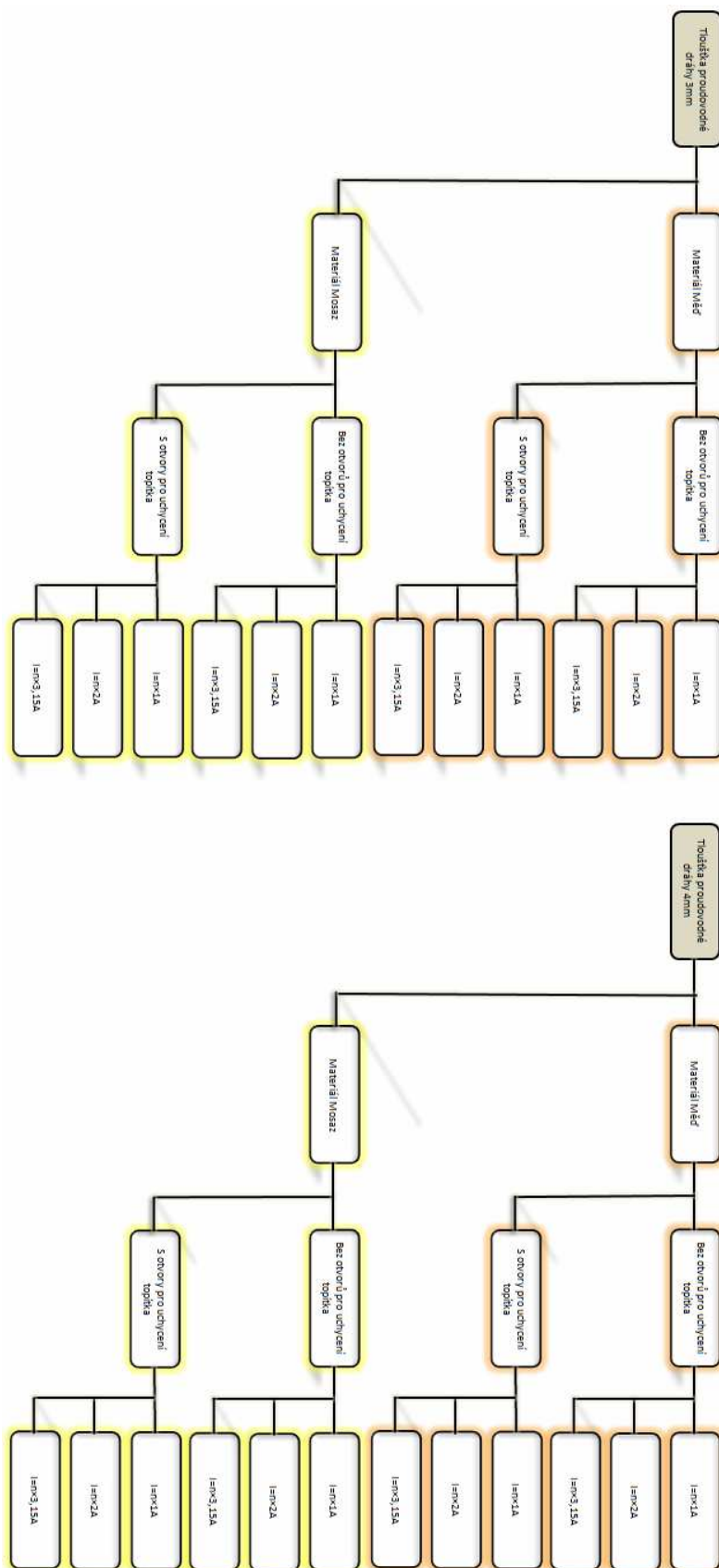
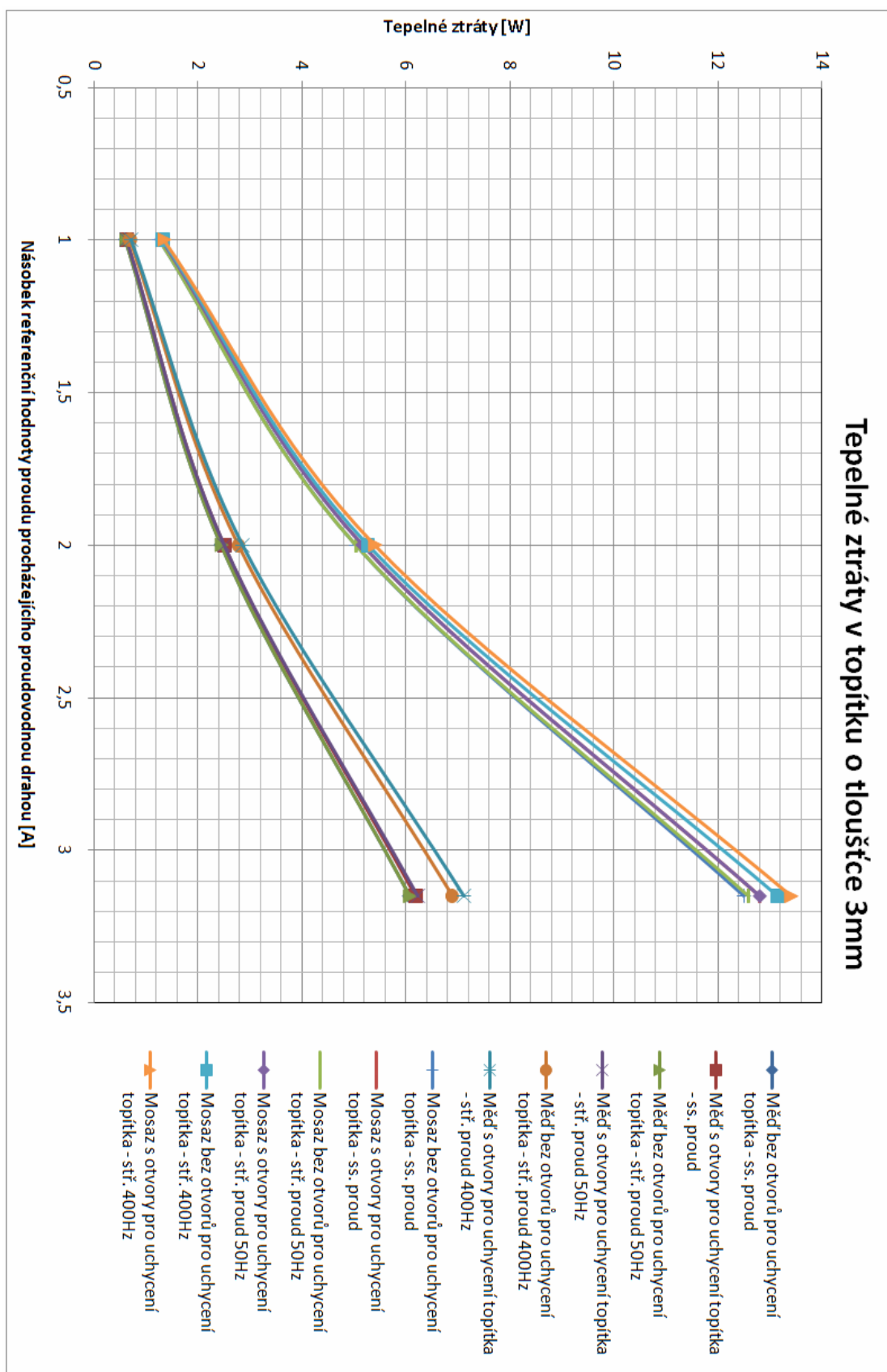
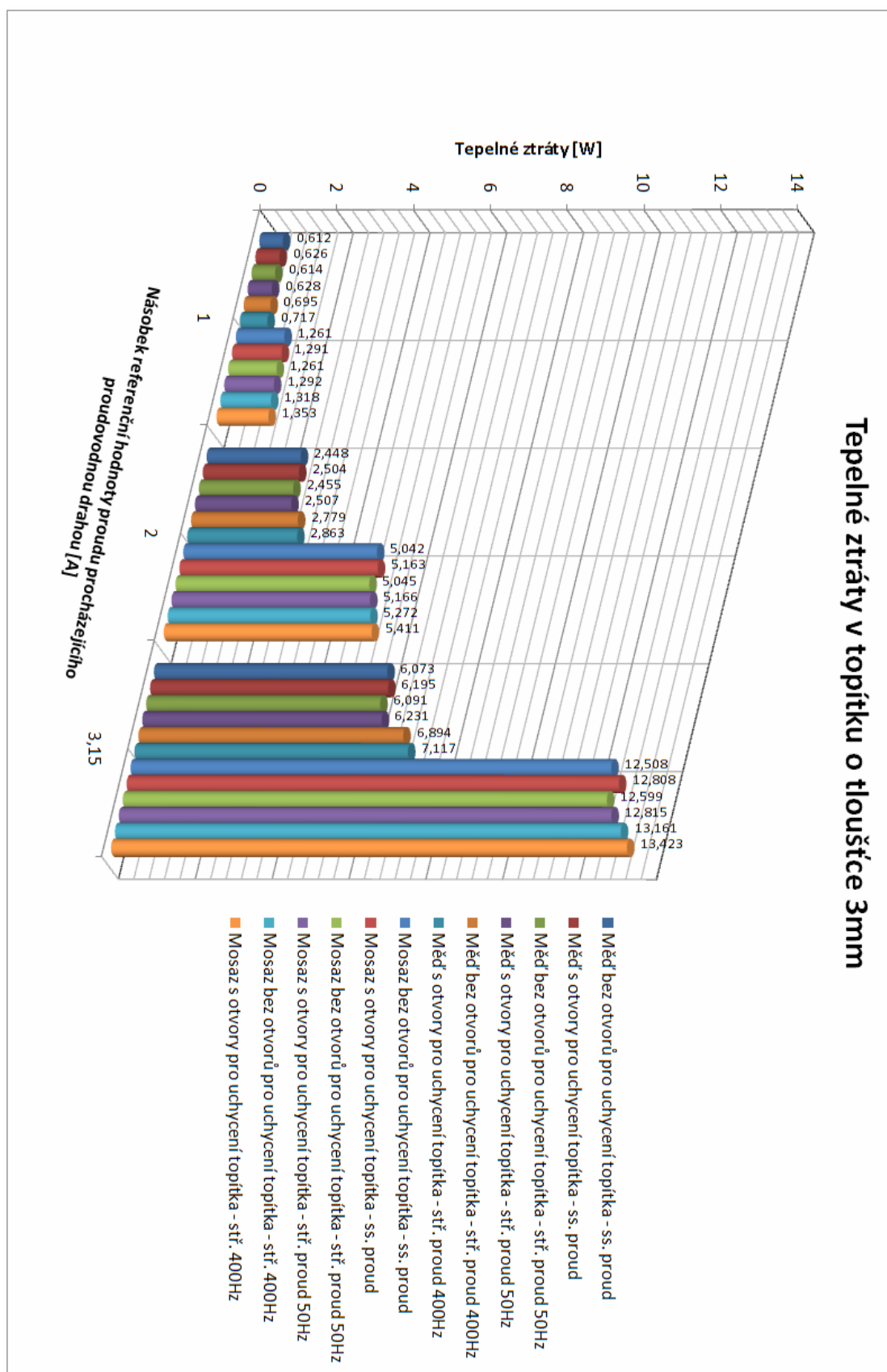


Diagram 3: Kombinace zadaných řešení tepelných úbytků pro střídavý proud o frekvenci 50 a 400Hz o n násobku referenční hodnoty procházejícího proudu

7.1 Výsledky

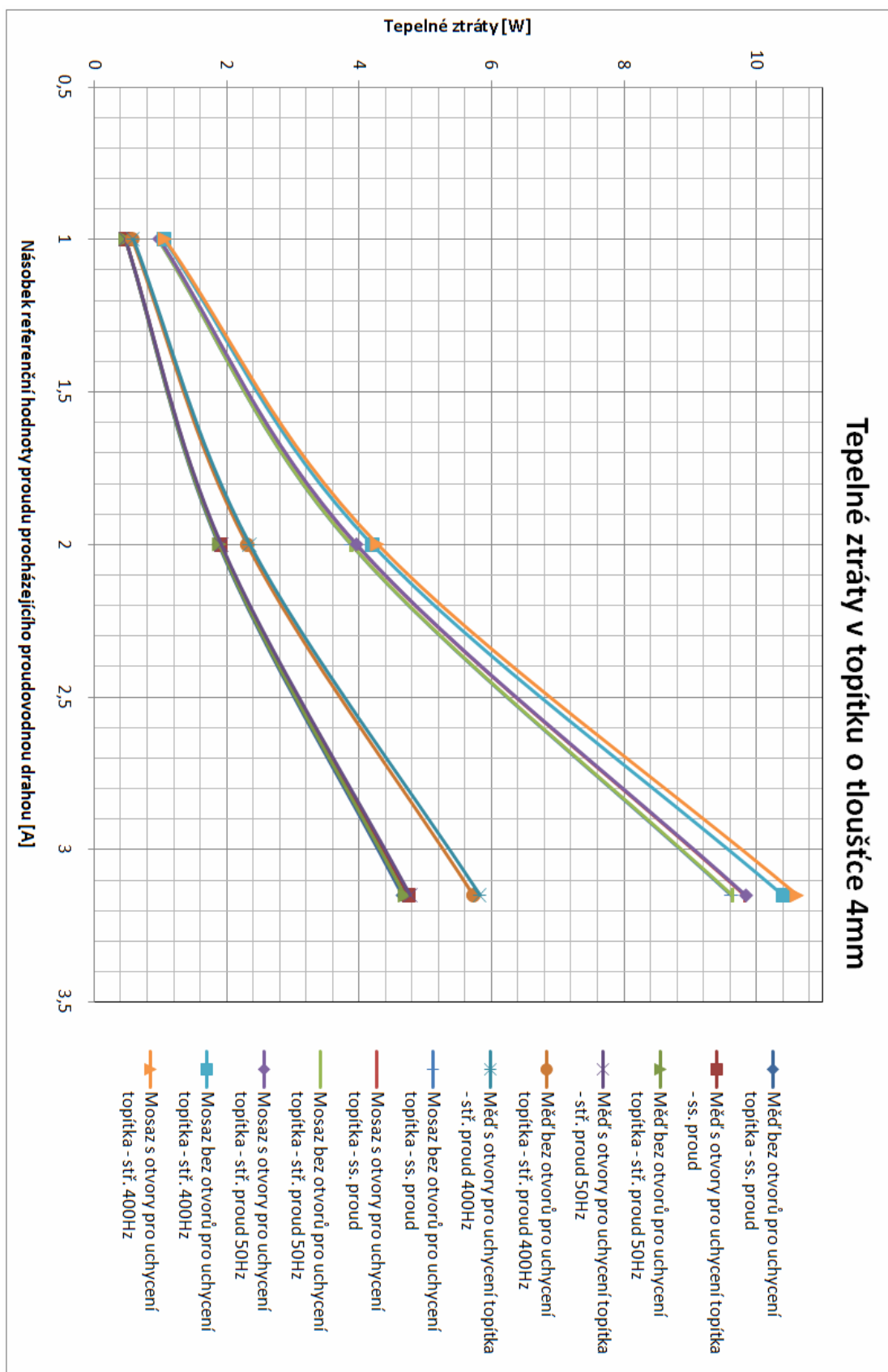


Graf 4: Tepelné ztráty v topítku o tloušťce 3mm (bodový graf)

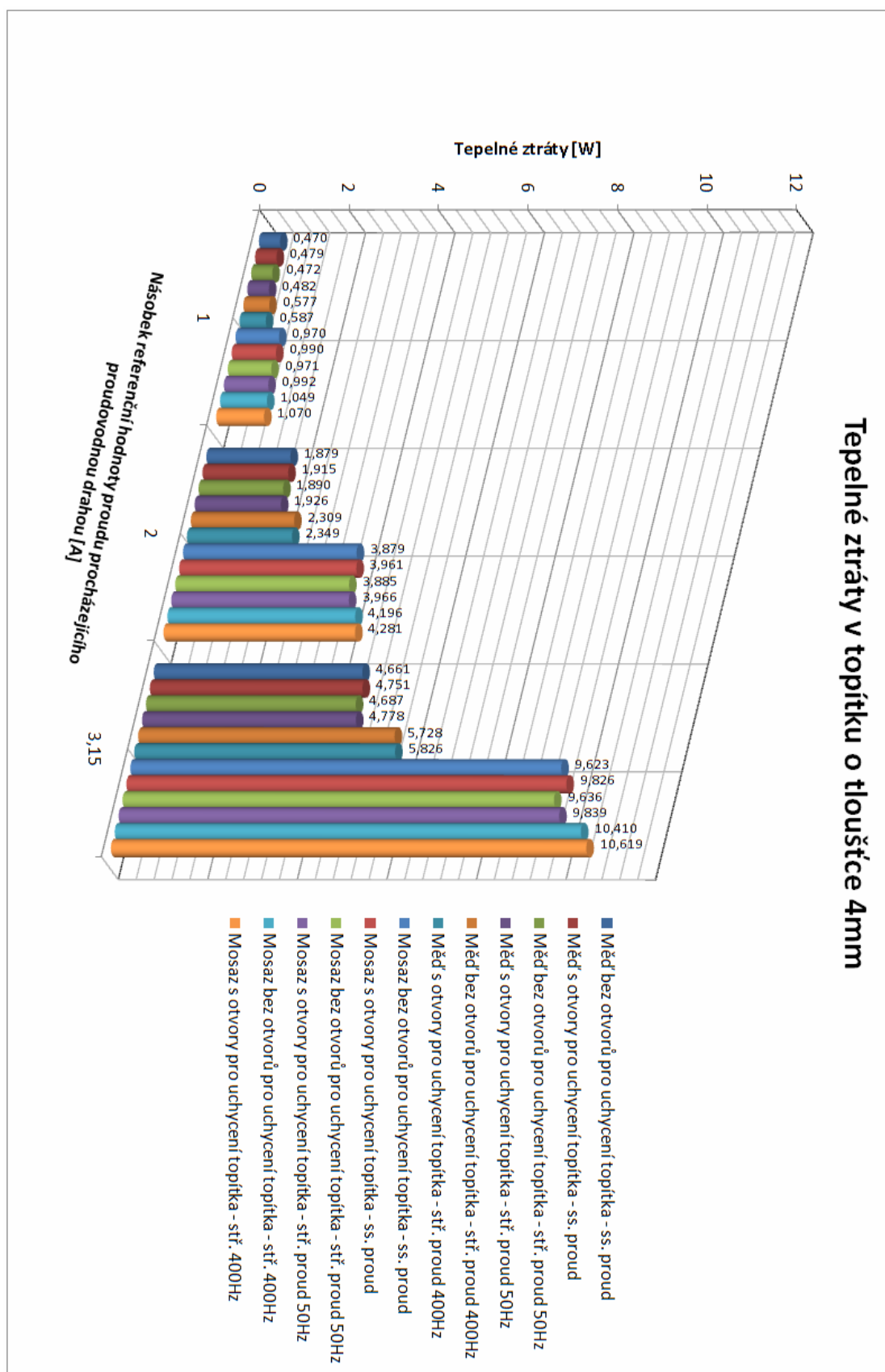


Graf 5: Tepelné ztráty v topítku o tloušťce 3mm (sloupcový graf)

Tepelné ztráty v topítku o tloušťce 4mm



Graf 6: Tepelné ztráty v topítku o tloušťce 4mm (bodový graf)



Graf 7: Tepelné ztráty v topítku o tloušťce 4mm (sloupcový graf)

8 STŘÍDAVÝ PROUD , TŘI PROUDOVODNÉ DRÁHY

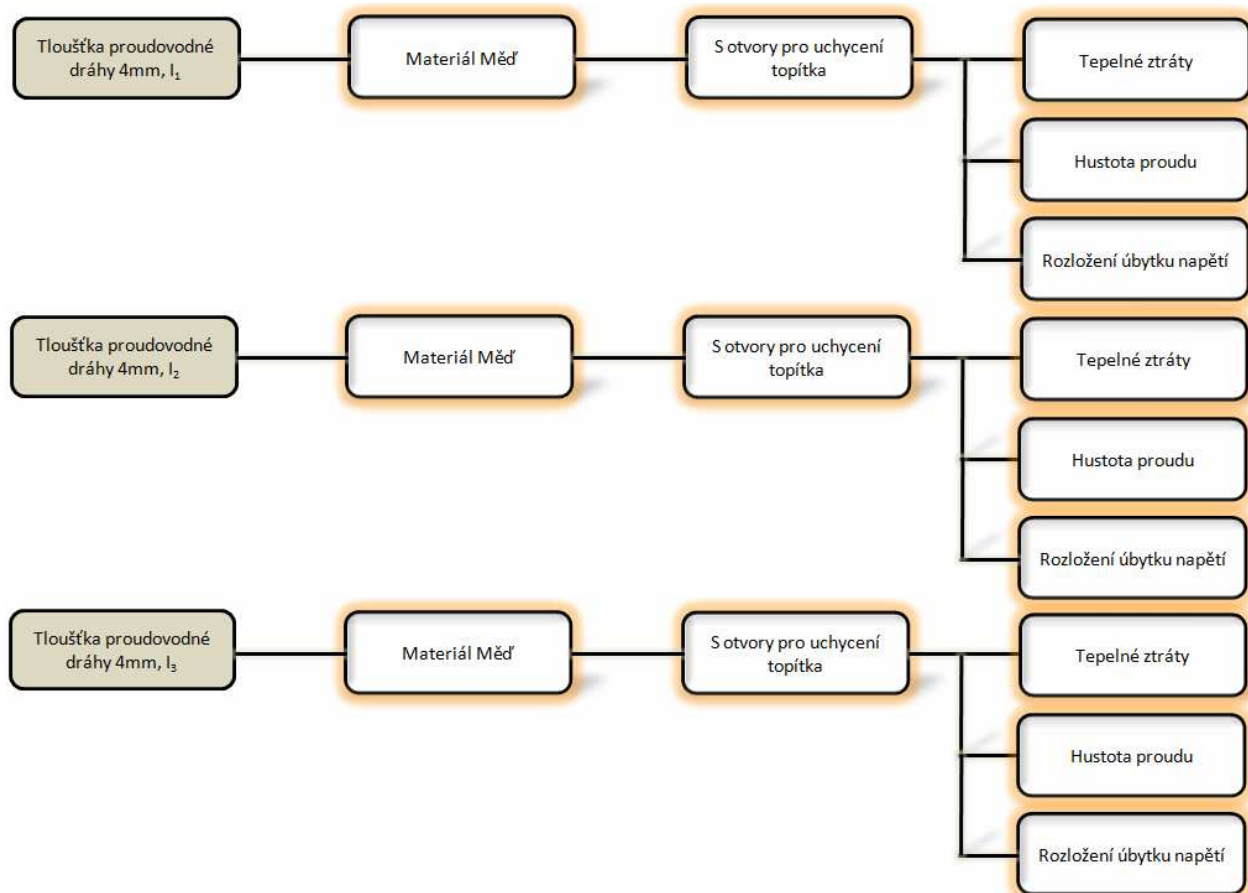
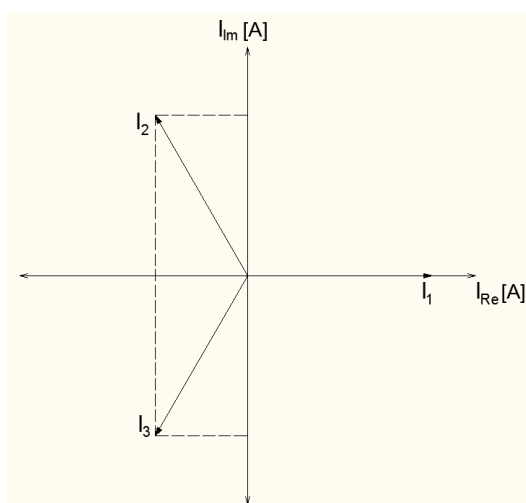


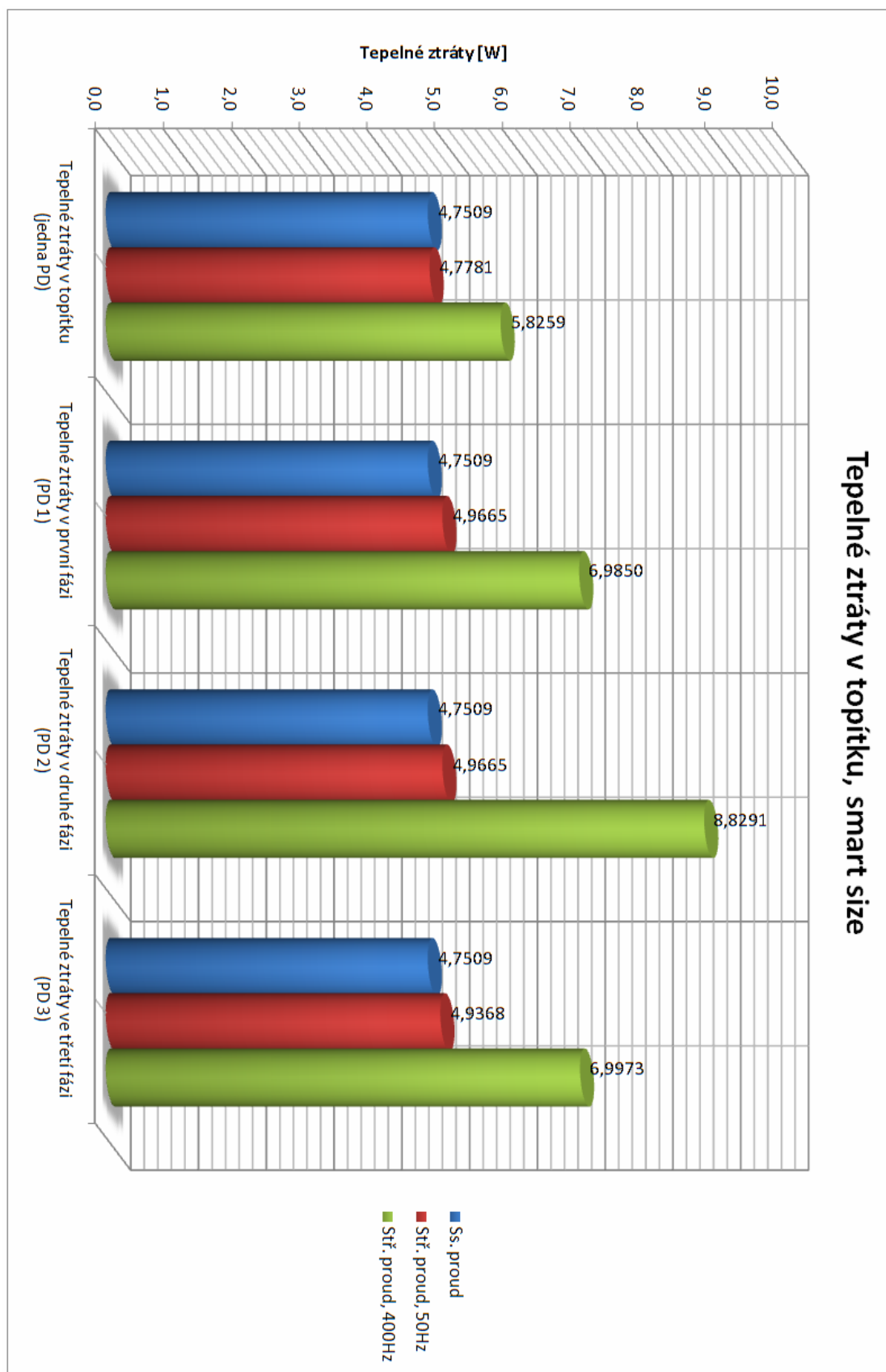
Diagram 4: Kombinace zadaných řešení tepelných úbytků pro střídavý proud o frekvenci 50 a 400Hz.



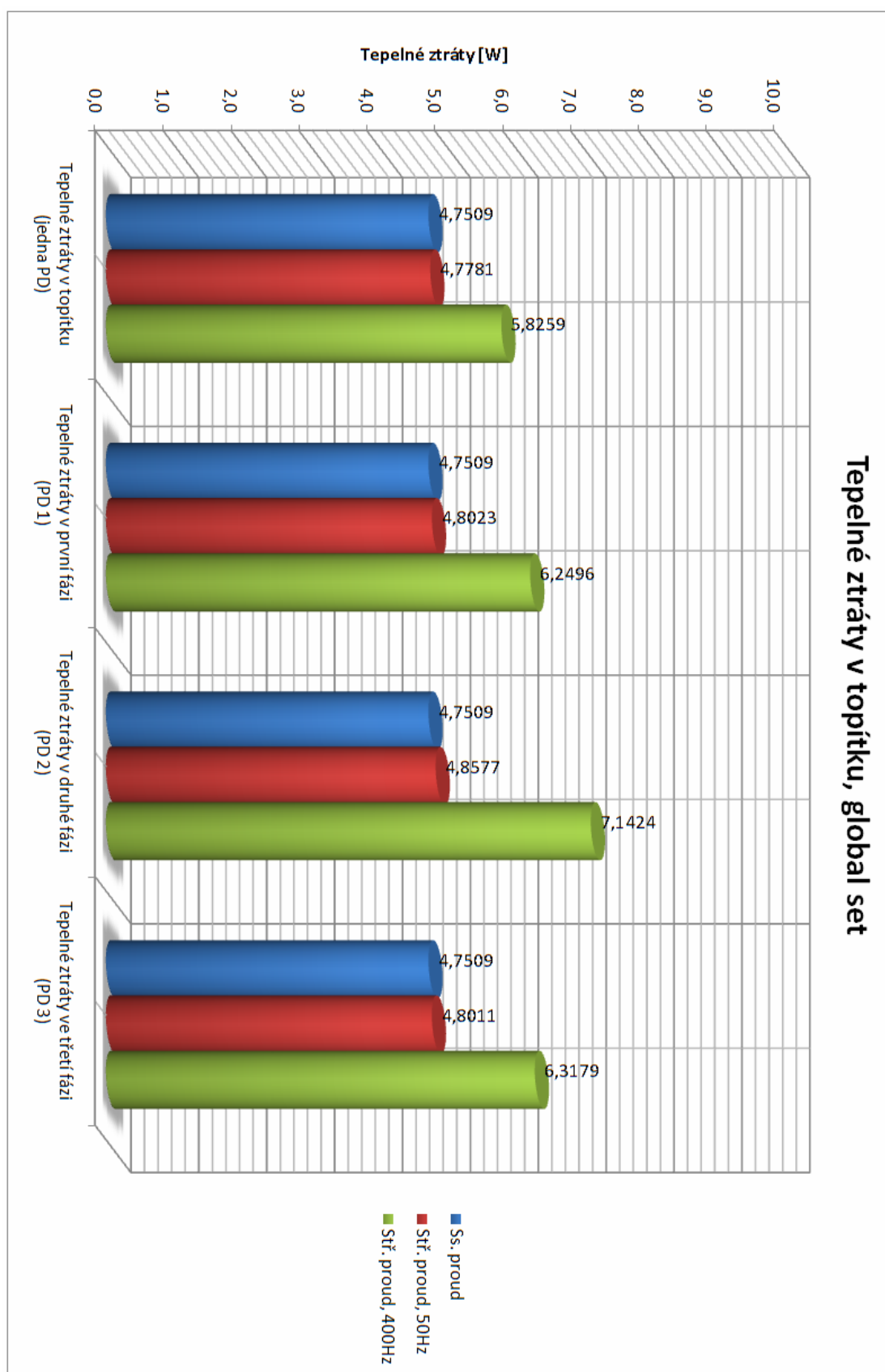
Obrázek 40: Rozložení proudu ve třech proudovodných drahách

Proud procházející proudovodnými drahami je navzájem pootočen o 120° elektrických.

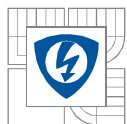
8.1 Výsledky



Graf 8: Tepelné ztráty mezi svorkami topítka, smart size



Graf 9: Tepelné ztráty mezi svorkami topítka, global set



9 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Porovnání výsledků s reálným modelem nebylo možné. Vývoj dané proudovodné dráhy a celého jističe stále pokračuje, proto došlo ke změně geometrie proudovodné dráhy, která v této chvíli není k dispozici jako reálný model. Celá práce byla simulována na současné geometrii proudovodné dráhy.

10 ZÁVĚR

Úvodem práce musela být celá zadaná proudovodná dráha překreslena v programu Solidworks a rozdělena na 22 různých elementů, aby ji bylo možné simulovat v programu Ansys.

Stejnoseměrný proud

Podle zadaných úkolů bylo na proudovodné dráze vypočteno řešení úbytků napětí, tepelných ztrát a rozložení proudu tekoucího touto dráhou. Kombinace různých řešení je zahrnuta v diagramu 1. Jedná se o 24 kombinací výsledků.

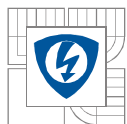
Největší úbytek napětí byl na proudovodné dráze topítka z mosazi o tloušťce 3mm při maximálním násobku referenční hodnoty proudu na geometrii s otvory pro uchycení topítka a to 20,4 mV. Pro porovnání, například při zvětšení tloušťky proudovodné dráhy z původních 3mm na 4mm dojde ke snížení úbytku napětí podle předchozích parametrů o 3,7mV. Úbytek napětí mezi svorkami topítka U_t je také zobrazen v grafu 1, kde je patrné, že největší úbytky napětí byly u mosazi o tloušťce 3mm a potom se postupně snižovaly u mosazi o tloušťce 4mm, mědi o tloušťce 3mm a nejmenší byly u mědi o tloušťce 4mm. Výpočet byl proveden s hodnotami rezistivity dodanými zadavatelem projektu a to pro měď $1,77e^{-8} \Omega.m$ a pro mosaz $4e^{-8} \Omega.m$.

Pro výpočet tepelných ztrát se vycházelo z úbytku napětí mezi svorkami topítka U_t a proudem procházejícím proudovodnou dráhou. Největší tepelný úbytek byl v proudovodné dráze topítka z mosazi o tloušťce 3mm při maximálním násobku referenční hodnoty proudu na geometrii s otvory pro uchycení topítka a to 12,8W. Pro porovnání, například při zvětšení tloušťky proudovodné dráhy z původních 3mm na 4mm dojde ke snížení tepelného úbytku podle předchozích parametrů o 2,33W. Tepelný úbytek mezi svorkami topítka je také zobrazen v grafu 2, kde je patrné, že největší tepelné úbytky byly u mosazi o tloušťce 3mm a potom se postupně snižovaly u mosazi o tloušťce 4mm, mědi o tloušťce 3mm a nejmenší byly u mědi o tloušťce 4mm.

V projektu je vybraná určitá část výsledků, které jsou zahrnuty v diagramu 2 a zobrazena v následných obrázcích.

Střídavý proud

V této části práce byly výpočty prováděny pro jednu proudovodnou dráhu a pro tři proudovodné dráhy, které představovaly skutečné rozmístění proudovodných drah obsažených v jističím prvku. Simulace byly prováděny pro stejné parametry a kombinace řešení jako v případě průchodu stejnosměrného proudu. Navíc tyto simulace byly doplněny o zhodnocení rozložení proudu a tepelných ztrát v proudovodné dráze s narůstající frekvencí časově proměnlivého proudu. Nárůst frekvence proudu způsobil povrchový jev, tzv. skin efekt, který má vliv na koncentraci rozložení hustoty



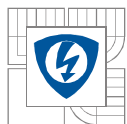
proudu v blízkosti povrchu simulované proudovodné dráhy. S narůstající koncentrací proudu dochází i k narůstajícím tepelným ztrátám oproti průchodu stejnosměrného proudu.

Získané výsledky v případě simulací prováděných pouze na jedné proudovodné dráze jsou zobrazeny na grafech 4, 5 pro topítko o tloušťce 3mm a grafech 6, 7 pro topítko o tloušťce 4mm.

V případě simulací průchodu proudu třemi proudovodnými drahami vycházíme z předpokladu, že procházející proudy simulují proud v třífázové soustavě, tj. proudy jsou navzájem posunuty o 120° . V tomto případě jsou tepelné ztráty na jednotlivých proudovodných drahách největší, protože jsou navzájem ovlivňovány jevem blízkosti. Největší tepelné ztráty jsou na prostřední proudovodné dráze, protože je ovlivňována jak pravou tak levou proudovodnou dráhou. Pro výpočty tří vedle sebe umístěných proudovodných drah byla volena geometrie topítka z mědi o tloušťce 4mm, kde nárůst tepelných ztrát oproti stejnosměrnému proudu byl největší a to až 22,91%. Grafy 8 a 9 znázorňují jak jsou výsledky simulací ovlivněné nevhodnou velikostí elementu vzduchového okolí a tím ovlivněného počtu elementů mezi simulovanými proudovodnými drahami. V případě zjemnění sítě prvků a tím následného navýšení počtu elementů mezi proudovodnými drahami bylo dosaženo mnohem přesnějších výsledků při použití velikosti elementu pomocí nastavení Global set.

V této práci jsou také porovnány výsledky numerických metod oproti výpočtům z Ansysu. Získané výsledky jsou v tabulkách 3 a 4. Bylo nutné vytvořit pro tyto výpočty dvě různé geometrie jak je zhodnoceno ve shrnutí kapitoly 6.5. Odchyłky výpočtů pomocí Ansysu oproti numerickým metodám vycházely v okolí dvou procent což je zanedbatelné a výpočet pomocí programu Ansys můžeme považovat za přesný.

Závěrem této práce měly být porovnány vypočtené výsledky se skutečnými výsledky naměřenými na reálném modelu. Vývoj zadané geometrie proudovodné dráhy a celého jističe stále pokračuje a reálný model simulované proudovodné dráhy zatím není k dispozici. Jediné hodnoty naměřené na původním modelu proudovodné dráhy se velmi blížily k vypočteným hodnotám nové geometrie proudovodné dráhy na které byly prováděny simulace obsažené v této práci. Na původním modelu byl naměřen úbytek napětí 11,5mV a na nové geometrii při stejných parametrech byl vypočten úbytek 9,78mV.



LITERATURA

- [1] Elektrický jistič In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 2009, 2010 [cit. 2010-05-07]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrický_jistič>.
- [2] ING. M. BERAN CSc, Elektrické ochrany strojů a zařízení elektrizační soustavy. SNTL – Ediční středisko VŠSE v Plzni, Plzeň, 1979. 75 s.
- [3] *Numerické simulace* [online]. [cit. 2010-05-07]. Metoda Konečných Prvků (Finite Element Method). Dostupné z WWW: <<http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/?q=node/32>>.
- [4] *Ansys - nápověda* [disk]. [cit. 10-12-09].
- [5] *SUB - ZÁVOD 07 MEP POSTŘELMOV* [online]. [cit. 2010-05-07]. Spouště. Dostupné z WWW: <http://www.mep.cz/rychl_spou.htm>.
- [6] BEZOUŠKA, Vladislav; POKORNÝ, Karel Konstrukční uspořádání jističe. In *Dimenzování a jištění el. obvodů, elektrické světlo*. [cit. 2010-05-07]. Dostupné z WWW: <www.tfirt.net/4sem/elektrotechnika_II/jisteni_svetlo.ppt>.
- [7] GROSS, Boleslav, et al. *Laboratorní a numerická cvičení z elektrických přístrojů*. 1. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1983. 145 s.
- [8] MYSLÍK, Jiří . *Elektromagnetické pole : základy teorie*. Praha : BEN - technická literatura, 1998. 159 s. ISBN 80-86056-43-0.